

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**AERODYNAMICKÁ ANALÝZA PROTOTYPU
LIETAJÚCEHO AUTOMOBILU AIRCAR 5.0**

AERODYNAMIC ANALYSIS OF THE AIRCAR 5.0 FLYING CAR PROTOTYPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Jánošík

VEDUCI PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Tomáš Jánošík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aerodynamická analýza prototypu létajícího automobilu Aircar 5.0

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vnější tvar prototypu Aircar 5.0 vychází z komplexních aerodynamických požadavků. Stroj musí prokazovat vhodné letové vlastnosti a zároveň být schopen stabilní a bezpečné jízdy na silničních komunikacích. Ta je však výrazně aerodynamicky ovlivněna skládacími nosnými plochami i celkovým tvarem kabiny. Proto je nutné automobilový mód z hlediska proudění analyzovat a následně navrhnout vhodné prostředky zajišťující dobrou pozemní stabilitu a to bez negativního ovlivnění letových vlastností.

Cíle diplomové práce:

CFD analýza modelu prototypu Aircar 5.0 v režimu automobil, určení aerodynamických charakteristik, návrh prostředků pro zlepšení těchto vlastností a ověření vlivu provedených změn na charakteristiky letového režimu.

Seznam doporučené literatury:

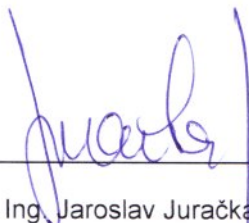
KATZ, J., Automotive aerodynamics, John Wiley & Sons. 2016, ISBN 9781119185727.

HUCHO, W., Aerodynamics of Road Vehicles, SAE International, ISBN 978-0768079777.

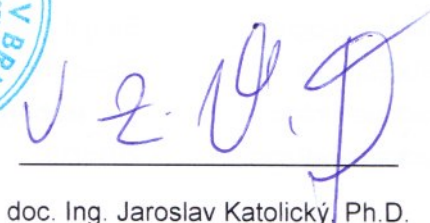
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 2. 11. 2018





doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavným zámerom tejto diplomovej práce je CFD analýza prototypu lietajúceho automobilu Aircar 5.0. Teoretická časť práce zhŕňa základné poznatky o spojitosti aerodynamiky lietadiel a automobilov ako aj o aerodynamike automobilov samotnej. Výpočtová časť začína kalibráciou matematického modelu, pokračuje CFD výpočtami, ktorých cieľom je stanoviť charakteristiky Aircaru v automobilovom móde spojené so správaním prúdového poľa v jeho okolí. Testované sú jednotlivé konfigurácie so zámerom zistenia vplyvu na aerodynamickú stabilitu a ich výhody a nevýhody sú zhodnotené v závere.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

aerodynamika, prúdenie, CFD, lietajúci automobil

ABSTRACT

This thesis focuses on CFD analysis of the Aircar 5.0 flying car prototype. The theoretical part covers basic information about the connection between the aerodynamics of airplanes and cars as well as cars themselves. The computational part begins with the calibration of the mathematical model, continues with the CFD simulations, which have the role to determine basic aerodynamic characteristics of the Aircar in vehicle mode. There are several configurations tested to find out their influence on aerodynamic stability and their advantages and disadvantages are summed up in the conclusion chapter.

KEYWORDS

aerodynamics, airflow, CFD, flying car

JÁNOŠÍK, Tomáš *Aerodynamická analýza prototypu lietajúceho automobilu Aircar 5.0*: diplomová práca. Brno: Výsoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, 2019, 122 str. Vedúci práce Ing. Robert Popela, PhD

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že túto prácu som vypracoval samostatne pod vedením Ing. Roberta Popelu, PhD. s využitím informačných zdrojov uvedených v zozname na konci práce

Brno

.....

Tomáš Jánošík

POĎAKOVANIE

Rád by som touto formou poďakoval všetkým, ktorý sa pričínili o zrealizovanie tejto práce. Špeciálne ďakujem za poskytnutie technického námetu a potrebných dát Štefanovi Kleinovi a všetkým jeho zamestnancom usilovne pracujúcim na stavbe prototypu nového lietajúceho automobilu. Za kontrolu, technické rady a trpezlivosť chcem poďakovať vedúcemu práce Robertovi Popelovi. Najväčšie poďakovanie ale patrí mojej rodine a priateľom, ktorý ma po všetkých potrebných stránkach podporovali počas celého štúdia.

Brno

.....

Tomáš Jánošík

Obsah

Úvod.....	13
I TEORETICKÁ ČASŤ	
1 Pojem „Lietajúci automobil“.....	14
1.1 História, prvé pokusy	14
1.2 Súčasný stav	19
1.2.1 Terrafugia	19
1.2.2 PAL – V.....	21
1.2.3 AeroMobil	22
1.2.4 I-TEC Maverick.....	24
2 Aerodynamika vozidla	25
2.1 Spojitosť lietadiel a vozidiel	26
2.2 Aerodynamické sily a momenty.....	30
2.2.1 Vznik aerodynamických síl a momentov	31
2.3 Aerodynamika výkonných vozidiel	34
2.3.1 Rola pneumatík, prítlačná sila	34
2.3.2 Vplyv aerodynamických síl na dynamiku vozidla	38
2.3.3 Generovanie prítlačnej sily.....	40
2.3.4 Vplyv uhlu náklonu	45
3 Konceptia prototypu Aircar 5.0.....	46
3.1 Aerodynamika	47
3.2 Transformácia	48
4 Metódy výskumu	50
4.1 Jazdné skúšky.....	50
4.2 Aerodynamický tunel	50
4.3 Výpočtové metódy	52

II VÝPOČTOVÁ ČASŤ

5	Kalibrácia matematického modelu	53
5.1	Geometria & Sieť	53
5.2	Model turbulencie & veľkosť buniek siete	57
5.3	Aerodynamické charakteristiky & porovnanie s letovým meraním	61
6	Aerodynamická analýza módu automobil	65
6.1	Nastavenie matematického modelu	65
6.2	Referenčné aerodynamické charakteristiky	70
6.3	Aerodynamická optimalizácia	74
6.3.1	Implementácia predného prítlačného krídla	75
6.3.2	Vychýlenie výškového kormidla	80
6.3.3	Implementácia pred. splitteru s vychýlením výškového kormidla	84
6.3.4	Úprava tvaru prednej časti podlahy	90
7	Záver	93

Zoznam použitých zdrojov	95
---------------------------------------	-----------

Zoznam skratiek a symbolov	99
---	-----------

PRÍLOHY

A	Vizualizácia Aircaru 5.0	102
B	Vyhodnotenie letových meraní	104
C	Vizualizácie kalibračných výpočtov	105
D	CFD výpočet vykonaný leteckým ústavom	108
E	Štruktúra výpočtovej siete vozidla	112
F	Ukazatele konverencie výpočtu	119
G	Vizualizácie prúdenia ref. stavu automobilu	121

ÚVOD

V dnešnej dobe je cestovanie veľmi zdĺhavé a človek v skutočnosti trávi pri presune z bodu A do bodu B relatívne malú dobu, pri ktorej sa naozaj „pohybuje“. Nekonečné čakania pri odbavovaní na letisku, státi na zastávke hromadnej dopravy alebo TAXI. Preto sa neustále hľadajú metódy, ako cestovanie nielen urýchliť ale aj spohodniť. Najmä pri kratších letoch (1000 – 2000 km) je podiel čakania veľmi nepriaznivý.

Dá sa tento problém vyriešiť? Akými spôsobmi? Je možné vybrať sa napríklad letecky na letnú dovolenku bez nutnosti riešiť parkovanie lietadla a pátrať po požičovni automobilov? Do úvahy prichádza koncepcia lietajúceho automobilu.



1 POJEM „LIETAJÚCI AUTOMOBIL“

Pod pojmom „lietajúci automobil“ je možné rozumieť osobné vzdušné vozidlo alebo cestné lietadlo, ktoré poskytuje dopravu „z domu do domu“ po zemi aj vo vzduchu. Lietajúce autá sú často súčasťami science fiction a fantasy príbehov, no mnohé sa už stali reálnymi. [30]

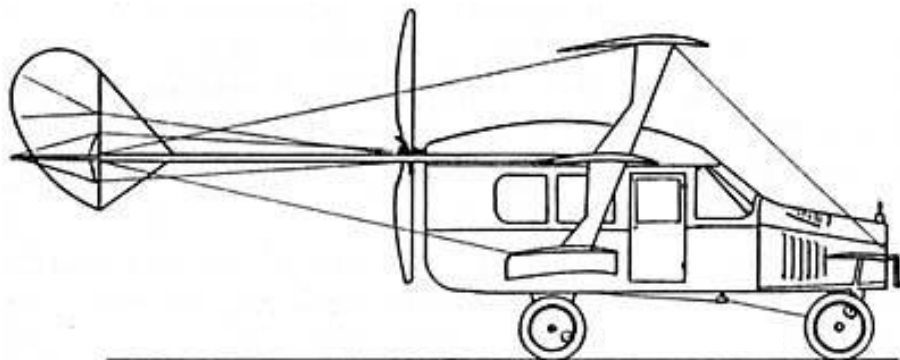
Od počiatku dvadsiatych rokov minulého storočia bolo postavené množstvo prototypov využívajúcich rôzne technológie. Niektoré boli dokonca schopné vertikálneho vzletu. Avšak žiadnemu z nich sa doposiaľ nepodarilo pokročiť k sériovej výrobe.

1.1 História, prvé pokusy

Iba necelých 15 rokov po tom, ako bratia Wrightovci uskutočnili prvý úspešný let, prišli iní priekopníci s myšlienkou lietajúceho automobilu.

Autoplane (1917)

V roku 1917 predstavil Glenn Curtiss prvý pokus o vytvorenie lietajúceho vozidla. Nazval ho Autoplane (obr. 1.1). Stroj mal tri krídla s rozpätím 12,2 metra, motor poháňal štvorlistú vrtuľu v tlačnom usporiadaní. Autoplane samozrejme nikdy nelietal, avšak pár krátkych „výskokov“ sa mu podarilo. [32]



Obr. 1.1: Autoplane konštruktéra Glenna Curtissa (1917) [14]

Arrowbile (1937)

Konštruktér menom Waldo Waterman vytvoril v roku 1937 stroj, ktorý nazval Arrowbile (obr. 1.2). Bolo to spojenie automobilu Studebaker¹ a lietadla. Vrtuľa sa taktiež nachádzala v zadnej časti vozidla, krídlo bolo kvôli uskladneniu delené. Trojkolesové vozidlo poháňal štandardný motor Studebaker s výkonom 74 kW. Na zemi bol automobil riadený predným kolesom. Volant v dvojmiestnej kabíne slúžil k ovládaniu Arrowmobilu na zemi aj vo vzduchu. Prvý let sa uskutočnil 21. 2. 1937. Nasledovali lety druhého a tretieho prototypu, vždy s drobnými úpravami. Avšak pre slabú odozvu trhu a nedostatok financií bol projekt v roku 1938 ukončený.

¹ Studebaker bol americký výrobca automobilov so sídlom v Indiane



Obr. 1.2: Watermanov Arrowbile (1937) [15]

Airphibian (1946)

Robert Fulton, vzdialený príbuzný vynálezcu parníku, vyvinul v roku 1946 stroj Airphibian (obr. 1.3). Na rozdiel od prvých dvoch uvedených, Fulton adaptoval lietadlo pre jazdu na cestách. Krídla a chvostová časť boli snímateľné. Vrtuľa sa dala uschovať do vnútra trupu lietadla. Demontáž týchto častí a transformácia na automobil trvala iba päť minút. Airphibian sa stal prvým lietajúcim automobilom certifikovaným inštitúciou Civil Aeronautics Administration². Disponoval šesťvalcovým motorom s výkonom 110 kW, lietal rýchlosťou 193 km/h a na cestách dokázal jazdiť 80 km/h. Napriek týmto úspechom sa Fultonovi nepodarilo nájsť dostatočnú finančnú podporu pre projekt. [32]



Obr. 1.3: Airphibian (1946) [16]

² Predchodca dnešnej Federal Aviation Administration (FAA)



ConvAirCar (1946)

V štyridsiatych rokoch minulého storočia vyvinula spoločnosť Convair dvojdvorový sedan so snímateľnou lietadlovou časťou. Existovali dva typy, prvý (Model 116) si odbil premiéru v roku 1946. Model 118 (obr. 1.4) nasledoval o rok neskôr a boli vyrobené dva prototypy. Mal dva motory, prvý slabučký 19 kW motor Crosley poháňal plastový štvorsedadlový automobil. Na pohon vrtule slúžil motor Lycoming s výkonom 142 kW pričom udávaná hladina cestovnej rýchlosti bola zhruba 200 km/h. Rozpätie krídel malo hodnotu 10,49 m. Pôvodný cieľ predstavoval vyrobiť 160 000 kusov s plánovanou cenou \$1,500 (cca \$20 000 v dnešných peniazoch). Po skúšobnom lete druhého prototypu však entuziazmus opadol a Convair ukončil program. [33]



Obr. 1.4: Convair Model 118 ConVairCar (1947) [17]

Aerocar (1949)

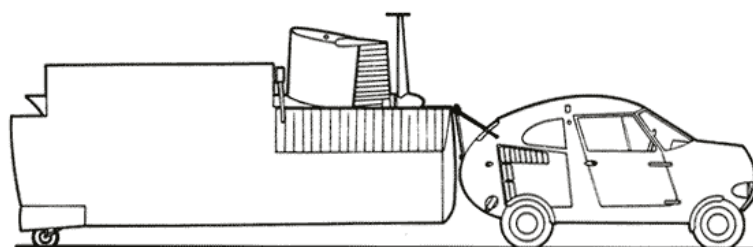
Dizajnérom tohto stroja je Američan Moulton Taylor. V roku 1946 sa počas výletu do Delawere stretol s vynálezcom predošlého lietajúceho automobilu Airphabian, s Robertom Fultonom. Taylor si uvedomil, že snímateľné krídla by bolo lepšie nahradiť skladacími. Tak jeho prototyp Aerocar (obr. 1.5) mohol byť konvertovaný do letového módu jednou osobou za päť minút. Jeden motor Lycoming s výkonom 107 kW sa využíval na pohon tlačnej vrtule a taktiež, cez trojstupňovú prevodovku, predných kolies kde sa počas letu jednoducho zaradil neutrál. Počas jazdy na ceste ťahal zložené krídla (rozpätie 10,36 m) automobil za sebou (obr. 1.6). Udávaná maximálna letová rýchlosť je 188 km/h, rýchlosť na ceste asi 100 km/h. V roku 1956 bol stroj certifikovaný a Taylor uzavrel dohodu so spoločnosťou LTV³ ohľadom sériovej produkcie s prísľubom, že dokáže zaobstarat' 500 objednávok. Bohužiaľ bol schopný zohnať iba polovičný počet

³ Americký konglomerát. Zahrňoval výrobu komponentov pre letectvo, elektroniku, farmaceutiku, športové vybavenie atď.

kupcov a plány sériovej produkcie skončili. Vyrobito sa 6 strojov, z ktorých posledný stále lieta. [34]



Obr. 1.5: Aerocar I (1949) [18]



Obr. 1.6: Aerocar I so zloženými krídlami [19]

Ford Volante Tri-Athodyne (1958, koncept)

V päťdesiatych rokoch 20. storočia vyvinuli dizajnéri z Fordu tento zmenšený model, aby ukázali ako by mohlo v budúcnosti vyzerat' masovo vyrábané lietajúce auto. Pomenovali ho Volante (obr. 1.7). Model nebol funkčný, reprezentoval iba návrhový koncept vozidla schopného operovať na cestách i vo vzduchu. Prestavoval veľmi sofistikované využitie princípu vrtule v prstenci. Predný rotor mal zakomponované dve protibežné vrtule, ktoré spolupracovali s dvoma menšími opačne rotujúcimi vrtuľami vzadu. Tento systém mal teoreticky odstrániť všetok odstredivý vplyv vrtule. Tým pádom by vozidlo nepotrebovalo chvostové plochy a vyrovnávací rotor. Ovládateľnosť mala byť zabezpečená systémom priečnych a pozdĺžnych kormidiel, čo by umožňovalo manévrovanie vo všetkých smeroch. [35]



Obr. 1.7: Ford Volante Tri-Athodyne (1958) [20]

Flight Innovations Sky Commuter (1990, koncept)

Nové lietajúce automobily sa pár desaťročí neobjavili, až kým tím inžinierov z Boeingu neprišiel z pokusom konečne preraziť s lietajúcim automobilom. A pokus to bol skutočne revolučný. Na rozdiel od väčšiny predošlých typov, ktoré sa zakladali na kompaktných automobiloch s „nasúvajúcimi krídlami“, Sky Commuter nemal priamo poháňané kolesá. Pohon na zemi i vo vzduchu zabezpečoval prúdový motor. Pre vertikálny vzlet bol cez reduktor napojený na vrtule na oboch stranách. Dopredný ťah zabezpečoval pomocou výstupnej dýzy v koncovej časti vozidla. Do projektu sa investovalo zhruba 6 miliónov \$ než bol zrušený. Boli postavené 3 prototypy, z toho posledný sa predal v roku 2015 v aukcii. [36]



Obr. 1.8: Sky Commuter (1990) [21]

Nikomu z uvedených sa nepodarilo vyvinúť životaschopný lietajúci automobil. Avšak tieto stroje ukázali, že myšlienka tohto spôsobu osobnej prepravy nepatrí do science fiction, čo inšpirovalo nové skupiny nadšencov. S príchodom nových materiálov, počítačového modelovania a počítačom riadených lietadiel je sen o sériovo vyrábaných lietajúcich automobilov veľmi blízko skutočnosti.

Ďalšia kapitola sa venuje súčasným projektom, ktorých produkty môžu o pár rokov stáť aj u nás doma.

1.2 Súčasný stav

V súčasnosti pracuje rada firiem na komerčných lietajúcich automobiloch a autonómnych vzdušných taxi (zvyčajne malé moduly poháňané elektrickými rotormi). Tu je niekoľko hlavných typov a ich momentálny stav.

1.2.1 Terrafugia

Terrafugia je čínska spoločnosť sídliaca v meste Woburn, Massachusetts. Bola založená absolventmi Ústavu letectva na Massachusetts Institute of Technology a absolventmi MIT Sloan School of Management. Ich business plán získal v roku 2006 druhé miesto v prestížnej súťaži \$100K Entrepreneurship Competition. Prototyp Transition sa tešil veľkému záujmu. V Júli roku 2017 spoločnosť odkúpil čínsky konglomerát Zhejiang Geely Holding Group, ktorý taktiež vlastní automobilky ako Volvo alebo Lotus. Rok 2017 začínala firma s 20 zamestnancami, do konca roka najala ďalších 75 a plánovala v tomto trende pokračovať. Nedávno založila nové výskumné, vývojové stredisko v Petalume v Kalifornii. Zamestnanci pracujú na vývoji niekoľkých modelov. [37]

Terrafugia Transition (prvý let 5.3.2009)

Model Transition (obr. 1.9) je vo vývoji od roku 2006. Postavilo sa niekoľko prototypov vo viacerých verziách. Terrafugia očakáva, že Transition bude používaný ako konvenčné športové lietadlo. Z toho vyplýva usporiadanie nosných plôch ako na klasickom lietadle s tým, že krídla sú skladateľné (obr. 1.10). Uvezie dvojčlennú posádku (pilot + 1 cestujúci). Kapotáž a nosné plochy sú vyrobené z uhlíkových vlákien. Pohon zabezpečuje motor Rotax 912. Počas jazdy je výkon cez variátor prenášaný na zadné kolesá. V letovom režime motor poháňa tlačnú vrtuľu. Ďalšie parametre udávané výrobcom sú v tabuľke 1.1. V súčasnosti Terrafugia prehlasuje, že je pripravená začať s výrobou modelu a predaj začne v roku 2019. [38]



Obr. 1.9: Terrafugia Transition [22]



Tab. 1.1: Základné parametre (Model z roku 2010)

Rozmery

Mód auto: 5,95 m x 2,1 m x 2,29 m

Mód lietadlo: 5,95 m x 8,3 m x 2,29 m

Maximálna vzletová hmotnosť: 650 kg⁴

Výkony

Maximálna rýchlosť: 100 kts (185 km/h)

Cestovná rýchlosť: 93 kts (172 km/h)

Pádová rýchlosť: 54 kts (100 km/h)

Maximálna cestná rýchlosť: 110 km/h



Obr. 1.10: Transition so zloženými krídlami [22]

Terrafugia TF-X (koncept, 2013)

V máji roku 2013 predstavila Terrafugia víziu štvormiestneho VTOL plug-in hybrid-elektrického vozidla. Koncept je vybavený polohovacími rotormi s polohou pre vzlet a dopredný let (obr. 1.11).



Obr. 1.11: Terrafugia TF-X [22]

Poháňaný je dvojicou elektrických motorov, ktoré v kombinácii s 220 kW benzínovým motorom produkujú 1000 kW. Terrafugia priznáva, že privedenie konceptu do výroby potrvá zhruba 8 až 12 rokov, takže ho do polovice nasledujúcej dekády s najväčšou pravdepodobnosťou na cestách neuvidíme.

⁴ Stroju bola udelená výnimka a bol certifikovaný ako ľahké športové lietadlo

1.2.2 PAL – V

Holandská spoločnosť PAL – V vznikla v roku 2008, avšak nápad skupiny ľudí postaviť lietajúci automobil na princípe 3-kolesového vírniku prišiel už v roku 2003. Táto koncepcia bola uprednostnená z niekoľkých dôvodov. Lietanie z vírnikom je bezpečné a dá sa ľahko naučiť. Taktiež im prišlo uskladnenie systému rotoru na vrchu vozidla viac kompaktné ako skladacie krídla.

Zmienенý koncept prinášal niekoľko výziev. Najväčšou bolo vysporiadať sa pri jazde na vozovke s vysoko umiestneným ťažiskom, pretože v prospech letovej stability je vhodné aby nositeľka vektoru ťahu (v tomto prípade z tlačnej vrtule) pretínala ťažisko.



Obr. 1.12: Carver One (2007) [23]

Z toho dôvodu sa dá za najväčší prelom považovať úspešná implementácia naklápajúceho systému do trojkolesového vozidla, ktorá sa v roku 2005 podarila holandskej spoločnosti Carver na vozidle Carver One (obr. 1.12). Od toho momentu sa začalo pracovať na stavbe prvého prototypu PAL – V.

PAL – V ONE (prvý let 2012)

Prvý prototyp, z ktorého sa odvíja model pripravovaný na predaj (PAL – V Liberty), uvezie dvoch cestujúcich vrátane pilota, je poháňaný benzínovým motorom Mistral (k dispozícii majú byť i motory na bionaftu alebo bioetanol).

Pri konverzii na lietajúci prostriedok je nutné zastaviť. Vysunie sa chvostový nosník a rozloží nosný rotor. Táto operácia nezaberie viac ako 10 minút. Hneď po naštartovaní motoru sa v zadnej časti trupu vysunie a rozloží tlačná vrtuľa, ktorá zabezpečuje ťah. PAL – V potrebuje pre vzlet plochu dlhú min. 165 metrov, môže byť spevnená alebo trávnatá. Pristávacia dráha je kratšia, stačí 30 metrov. Niekoľko ďalších parametrov je uvedených v tabuľke 1.2. PAL – V plánuje v roku 2020 predáť kľúč prvému zákazníkovi. [31]

Tab. 1.2: Základné parametre PAL - V Liberty

Rozmery**Mód auto:** 4 m x 2 m x 1,7 m**Mód lietadlo:** 6,1 m x 2 m x 3,2 m**Maximálna vzletová hmotnosť:** 910 kg**Výkony****Maximálna rýchlosť:** 97 kts (180 km/h)**Cestovná rýchlosť:** 81 kts (150 km/h)**Pádová rýchlosť:** 27 kts (50 km/h)**Maximálna rýchlosť na ceste:** 160 km/h

Obr. 1.13: PAL - V Liberty v cestnom móde [24]



Obr. 1.14: PAL - V Liberty v letovom móde [24]

1.2.3 AeroMobil

Slovenská Republika nie je práve Silicon Valley. Avšak riaditeľstvo firmy AeroMobil je pôsobivá inštitúcia na predmestí Bratislavy, v regióne, ktorý produkuje viac automobilov na obyvateľa ako kdekoľvek na svete, domov „fabriky“ VW a PSA.

AeroMobil vznikol v roku 2010 na podnet Štefana Kleina. Dizajnér, konštruktér a pedagóg VŠVU (Vysoká škola výtvarných umení) začal na projekte pracovať začiatkom 90. rokov. Koncepcia zahŕňa skladacie krídla. Prvý prototyp, V2.5 sa objavil v roku 2013 a spoločnosť uznala, že stroj má potenciál i keď v porovnaní s najnovším modelom už môže vyzerieť zastaralo. O 10 mesiacov sa objavila verzia V3.0, výsledok práce 12 ľudí, ktorá prehĺbila koncepciu prvého prototypu. Firma si patentovala mnoho technických riešení a dokázala sa zviditeľniť aj v očiach veľikánov ako NASA a Boeing. Verzia 3.0 obdržala veľa pozitívnych ohlasov, prilákali sa noví investori. Do spoločnosti sa zapojili ďalší vplyvní ľudia a bola započatá cesta k modelu AeroMobil 4.0. [29]

AeroMobil 4.0 (2017)

Najnovší AeroMobil (obr. 1.15) je zámerne koncipovaný ako atraktívne, technicky pokrokové a v neposlednom rade luxusné vozidlo, ktorého cieľom je ukázať jedinečné inžinierske schopnosti celého tímu a prezentovať AeroMobil ako inovatívnu značku a lídra v rýchlo sa vyvíjajúcom priemysle osobných lietajúcich vozidiel.

Kvôli optimalizácii hmotnosti je z materiálového hľadiska maximalizované použitie uhlíkových vlákien. Z uhlíkového pre-pregu je napríklad nosná štruktúra kabíny. O pohon vo vzduchu sa stará štvorvalcový plochý motor vyvinutý firmou Prodrive⁵ špeciálne pre AeroMobil. Motor produkuje 224 kW (300 Hp) a poháňa staviteľnú tlačnú vrtuľu s otáčkami 2400/min. Slúži tiež ako generátor pre dva elektrické motory produkujúce dohromady 80kW, poháňajúce predné kolesá, ktoré sa pred jazdou na ceste mierne vysúvajú do strán aby rozšírili stopu a zabezpečili vyššiu mieru stability.

Udávaný dolet je približne 750 km. Rozmery a rýchlostné charakteristiky sa nachádzajú v tabuľke 1.3. [39]



Obr. 1.15: AeroMobil 4.0 v letovom móde [25]

Tab. 1.3: Základné parametre AeroMobil 4.0

Rozmery

Mód auto: 5,9 m x 2,2 m x 1,5 m

Mód lietadlo: 5,8 m x 8,8 m x 1,4 m

Maximálna vzletová hmotnosť: 960 kg

Prázdna hmotnosť: 720 kg

Výkony

Maximálna rýchlosť: 194 kts (360 km/h)

Cestovná rýchlosť: 140 kts (259 km/h)

Pádová rýchlosť: 60 kts (112 km/h)

Maximálna rýchlosť na ceste: 160 km/h



Obr. 1.16: AeroMobil 4.0 v cestnom móde [25]

⁵ Britská tuningová spoločnosť so sídlom v Banbury. Zaoberá sa navrhovaním, konštrukciou a prípravou pretekárskych a rally automobilov.

1.2.4 I-TEC Maverick

Je výsledok 6-ročného vývoja neziskovej organizácie I-TEC. Jednomiestne vozidlo je schopné letu vďaka rozmernému parafoilu⁶ a vrtule (obr. 1.17). Konceptcia ho predurčuje k inému využitiu ako u predošlých spomenutých strojov. Trubková štruktúra je podobná bugine, čo umožňuje Mavericku jazdiť i na nespevnených cestách.

Váži necelých 500 kg a má prepravnú kapacitu ekvivalentnú s Cessnou 172. Toto vozidlo dokáže vzlietnuť a pristáť aj za zhoršeného počasia. Dizajnéri predpovedajú využitie stoja napríklad farmármi, majiteľmi rančov a kýmkoľvek s potrebou cestovania oblasťami bez ciest.

Pohon zabezpečuje 2,5 l motor Subaru s výkonom 140 kW. Výrobcom udávaná cestovná rýchlosť má hodnotu 35 kts (64 km/h), s výdržou 3 hod. [40]



Obr. 1.17: I-TEC Maverick [26]

⁶ Netuhý profil vo forme padáku nafukovaný vetrom

2 AERODYNAMIKA VOZIDLA

Spojenie aerodynamiky s automobilizmom bol veľmi pomalý proces. V začiatkoch nemali dizajnéri automobilov prírodný vzor, na rozdiel od konštruktérov lietadiel a lodí, ktorých tvar sa odvíjal od vtákov a rýb. Z toho dôvodu sa predstavitelia automobiliek pokúšali prevziať tvar svojich modelov práve z lietadiel a lodí, zdalo sa im to perspektívne. [1]

Prvé automobily boli pomalé. Na nespevnených cestách by v tých časoch vyzeral aerodynamicky tvarovaný automobil smiešne. Ochrana posádky pred vetrom, blatom a dažďom mohla byť dosiahnutá tradičným dizajnom v štýle kočov s konským záprahom. Ako čas plynul, zistilo sa, že potreba aplikovania aerodynamiky v dizajne vozidiel spočíva v ekonomických dôvodoch. [1]

Aerodynamický odpor je momentálne z hľadiska aerodynamiky vozidiel stredobodom záujmu. Najmä jeho bez-jednotkový ukazovateľ, koeficient odporu - C_D , sa stal takmer synonymom pre celú disciplínu. Jeho dôležitosť nemožno poprieť, je porovnateľná napríklad s kompresným pomerom spaľovacieho motoru. Výkon, spotreba paliva, emisie a maximálna rýchlosť sú podstatné parametre ovplyvňujúce predaj, ktoré sú závislé na aerodynamickom odpore. [1]



Obr. 2.1: Aspekty aerodynamiky vozidla [1]

Avšak aerodynamika vozidla je viac než to, ako je zobrazené na obr. 2.1. Prúdenie v okolí vozidla zodpovedá tiež za smerovú stabilitu a množstvo ďalších oblastí. Bolo to v 30tych rokoch minulého storočia, keď sa prvý krát prejavila dôležitosť vztlakovej sily. Daimler-Benz sa pokúšal o prekonanie rýchlostného rekordu. V rýchlosti cez 400 km/h došlo v dôsledku odlepenia predných kolies od zeme k totálnej strate ovládateľnosti. Taký bol efekt vztlaku na prednú nápravu. [5]

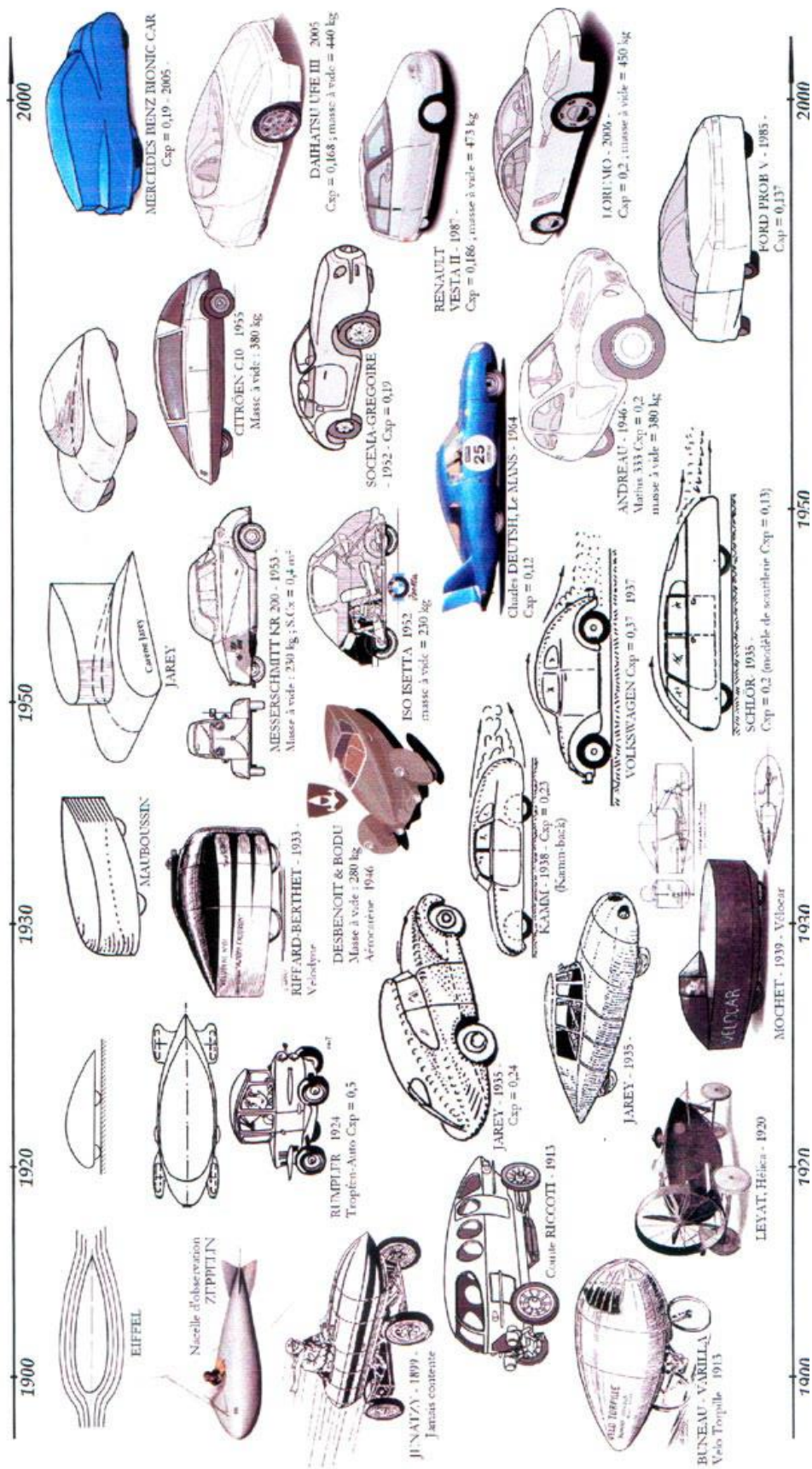


Bežné sériové automobily produkujú i dnes mierny vztlak, čo je ale pri bežných rýchlostiach zanedbateľné. U športových a závodných automobilov sú však často využívané prostriedky na generovanie záporného vztlaku – prítlaku, čo im umožňuje jazdiť veľkými rýchlosťami s plnou kontrolou.

V ďalších kapitolách bude týmto prostriedkom venovaná špeciálna pozornosť.

2.1 Spojitosť lietadiel a vozidiel

Niet pochýb, že aerodynamika cestných vozidiel má svoje korene v aerodynamike lietadiel. Schematický obrázok 2.2 sumarizuje ako sa tvar automobilu vyvinul z tvaru profilu krídla. Význam aerodynamiky u vozidiel a lietadiel sa líši. Lietadlo „nedokáže žiť“ bez aerodynamiky, vozidlo áno. Avšak medzi týmito dvoma disciplínami existuje niekoľko paralel. Ich primárny cieľ je podobný. Pre zabezpečenie dobrých jazdných i letových vlastností je kladená priorita na nízky aerodynamický odpor. Ak sa dosiahne dobrý balans síl a momentov vzhľadom na osi kolmé k smeru pohybu, môže byť dosiahnutá dobrá stabilita pri jazde aj počas letu (laterálna stabilita). Okrem toho, spracovanie aerodynamických dát (či už vypočítaných alebo experimentálne zmeraných) má mnoho podobností. [1]

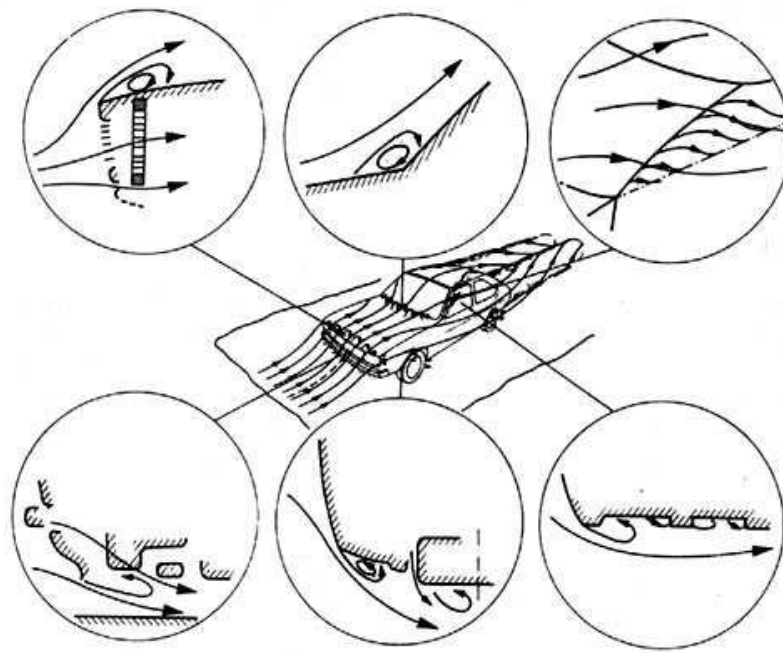


Obr. 2.2: Vývoj tvaru automobilu [2]



Avšak v charaktere prúdenia v okolí vozidla a lietadla je mnoho odlišností s ohľadom na nasledujúce aspekty:

1. V terminológii mechaniky tekutín sú vozidlá „bluff bodies“. Znamená to (obr. 2.3), že prúdenie v ich okolí je charakterizované separáciou. V oblastiach kde je nepriaznivý (adverse) tlakový gradient príliš veľký dochádza k odtrhnutiu (separácii) prúdenia. Dôvodom tohto javu je strata kinetickej energie spôsobená trením na povrchu. Existujú dva významné druhy separácie. Úplav (v angličtine označovaný ako „wake“, niekedy tiež „dead water“), a pozdĺžne vírenie. Obe sú vo významnej interakcii s hlavným prúdovým polom, v ktorom by inak trenie nehralo veľkú roľu. To znamená, že pre pozemné vozidlá nie je vplyv trenia obmedzený na tenkú vrstvu v blízkosti povrchu, takzvanú medznú vrstvu, ale existuje v širokých regiónoch obklopujúceho priestoru. Úlohou aerodynamikov je zamedziť týmto javom, alebo ak je to možné, odladiť ich aby „nenarušovali“ prúdenie. „Narušovať“ v tomto kontexte znamená generovať prídavný odpor, hluk, alebo dovoliť vode a blatu zašpiniť vozidlo. V kontraste s tým, je prúdové pole okolo lietadla charakterizované prúdením, ktoré je prilnuté na väčšine povrchu – pokiaľ vylúčime tenké delta krídlo ako u Concordu alebo raketoplán pri štarte a pristátí. Krídlo, chvostová časť, trup a motorové gondoly sú navrhnuté, aby udržali prúdenie hladké a prilnuté. Vplyv viskozity vzduchu je obmedzený na veľmi tenkú medznú vrstvu a úzky úplav za lietadlom. Interakcia medzi v podstate neviskóznym vonkajším prúdením a medznou vrstvou je slabá (u nízkych podzvukových rýchlostí). [1]
2. S ohľadom na geometriu sa líšia v tom, že tvar vozidla nemožno rozdeliť na elementárne komponenty jasne rozoznateľné s hľadiska mechaniky tekutín. Ani u závodných automobilov, kde sa to môže zdať uskutočniteľné, nie je možné celkový tvar rozdeliť, pretože dochádza k silnej interakcii medzi jednotlivými časťami. Segmentácia je využívaná pri aerodynamickom návrhu lietadiel. Na začiatku je každý komponent optimalizovaný zvlášť. Interakcie sú zahrnuté až v ďalšom kroku. Dokonca aj konkrétny komponent, napríklad krídlo, môže byť ďalej segmentované. Trojrozmerné prúdenie je rozlišované od dvojrozmerného, dodatočne sú skĺbené dohromady. Táto procedúra nie je aplikovateľná pre vývoj automobilu, tvar musí byť uvažovaný ako celok. [1]



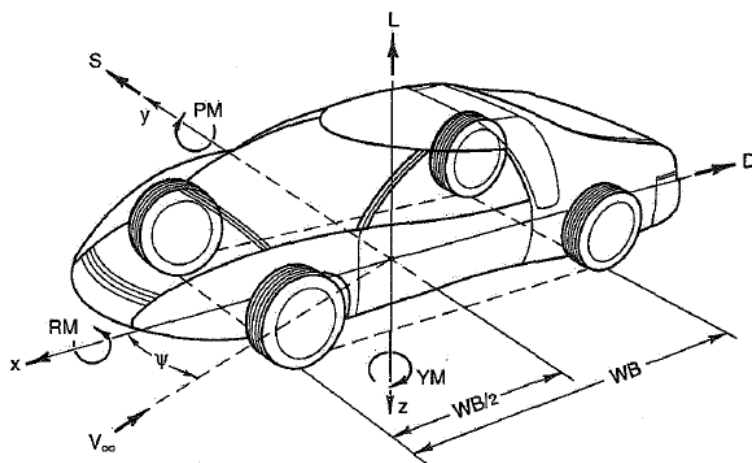
Obr. 2.3: Oblasti so separáciou prúdenia [2]

3. Automobily operujú v relatívne veľmi malých vzdialenostiach od zeme. Prívlastok „relatívne“ znamená v porovnaní s hlavným rozmerom vozidla, napríklad dĺžkou. Interakcia so zemou je tak veľká, že ju nie je možné v žiadnom prípade zanedbať. [1]

Prípustnosť rozdelenia lietadla na geometrické komponenty zjednodušila popis aerodynamiky hneď od začiatku prvého letu. Vyvinulo sa množstvo teoretických a experimentálnych vývojových procesov, ktoré sú v súčasnosti viac a viac nahradzované numerickými metódami. [1]

2.2 Aerodynamické sily a momenty

Prúdenie v okolí vozidla nespôsobuje iba odpor (drag (D)). Vznikajú ďalšie aerodynamické sily a momenty (obr. 2.4), ktoré vo vysokej miere ovplyvňujú stabilitu jazdy. Vo vysokých rýchlostiach môže byť ich vplyv znateľný na jazdnom komforte, a v extrémnych prípadoch tiež znížiť bezpečnosť. [1]



Obr. 2.4: Sily a momenty pôsobiace na vozidlo [4]

Charakter prúdového poľa vyplývajúci z dopredného pohybu vozidla produkuje vztlak (lift (L)) a klopíaci moment (pitching moment (PM)). Tie majú za následok zmenu zaťaženia pôsobiaceho na kolesá a mieru priľnavosti pneumatík. Striedavé pôsobenie týchto síl a momentov vplyva na smerovú stabilitu v doprednej jazde a prirodzené správanie riadenia behom zmeny smeru. [1]

Z dôvodu vetra a predbiehajúcich manévrov sa stáva prúdenie okolo vozidla nesymetrické. Vďaka tomuto javu vzniká na vozidle bočná sila (side force (S)), zatačavý moment (yawing moment (YM)) a kloníaci moment (rolling moment (RM)). Mení sa aj vztlak a klopíaci moment. Takto vzniknuté sily a momenty vedú k odchýleniu smeru jazdy, na čo musí šofér reagovať zásahom do riadenia. [1]

Parametrom, ktorý najviac ovplyvňuje veľkosť síl a momentov je rýchlosť prúdenia. Obecne možno hodnotu aerodynamickej sily (napríklad vztlaku) vyjadriť vzťahom:

$$L = c_L(\psi) \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (2.1)$$

A momentu (napríklad klopíaceho) nasledovne:

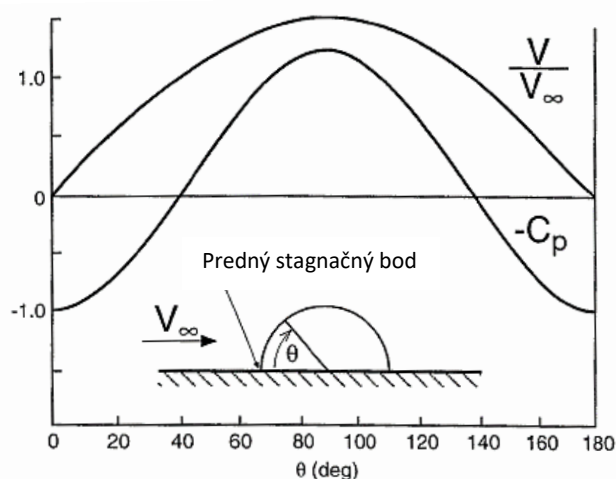
$$M = c_M(\psi) \frac{\rho}{2} v^2 A l \quad (2.2)$$

Kde ρ vyjadruje hustotu vzduchu, v je rýchlosť nabiehajúceho prúdenia, A je čelná plocha vozidla a l vzdialenosť medzi nápravami. Výsledná hodnota síl a momentov závisí tiež na uhle zatočenia Ψ a tvare vozidla, ktorého aerodynamické vlastnosti reprezentuje bezrozmerný koeficient c_L ; c_M ... Vzťahy pre zvyšné sily a momenty sú ekvivalentné s daným indexovaním:

- a) $L (c_L)$ – vztlaková sila
- b) $D (c_D)$ – odporová sila
- c) $Y (c_Y)$ – bočná sila
- d) $M (c_M)$ – klopiači moment
- e) $N (c_N)$ – zatačavý moment
- f) $R (c_R)$ – kloniači moment

2.2.1 Vznik aerodynamických síl a momentov

Pre porozumenie vzniku vztlaku a klopiačeho momentu je nutné kvantifikovať prúdenie v rovine symetrie vozidla. Vyplýva zo správania na konkávnom a konvexnom povrchu (obr. 2.5).



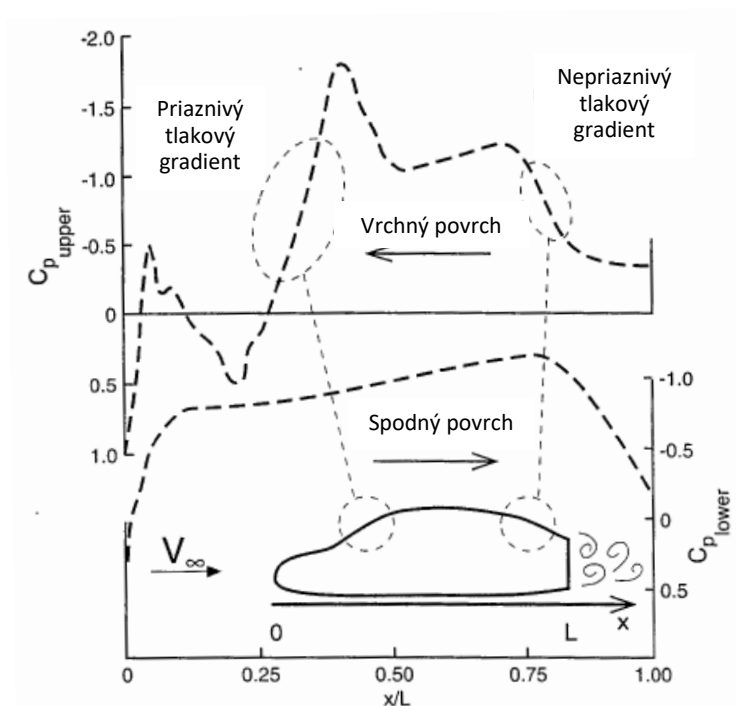
Obr. 2.5: Rozloženie rýchlosti a tlaku po povrchu 2D hemisféry [3]

Vo všeobecnosti je možné tvrdiť, že rýchlosť stúpa so zväčšujúcou sa hrúbkou (alebo výškou) telesa, zatiaľ čo (na základe Bernoulliho rovnice) tlak klesá. [3]

Rovnaký princíp sa dá aplikovať na bežný tvar automobilu (obr. 2.6). V nábežnej časti sa nachádza stagnačný bod, rýchlosť je tu nulová ($C_p = 1$). Prúdenie nasledovne akceleruje po prednej kapote ($C_p < 0$) keďže jej tvar sa dá klasifikovať ako konvexný. V koreni čelného skla dochádza k miernemu spomaleniu. Prúdenie je znova urýchlené prechodom okolo strechy, kde je badateľný najnižší tlak. Skrz zadnú časť je táto

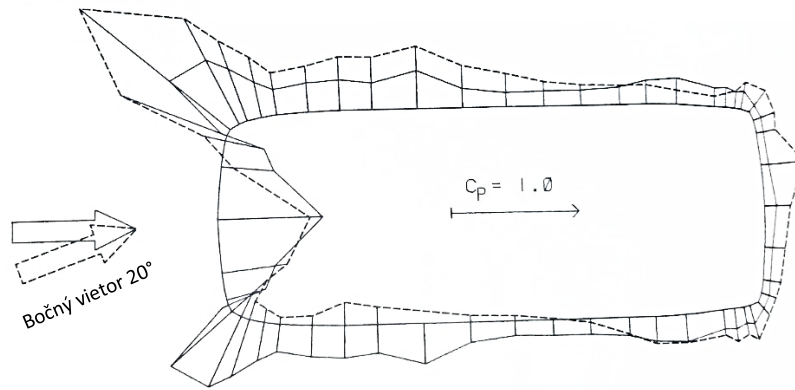
sekvencia zmeny rýchlosti obrátená. Na obrázku 2.6 je taktiež rozloženie tlaku po spodnej časti vozidla. [3]

Toto rozloženie tlaku vysvetľuje pôvod niekoľkých aerodynamických síl. Za vozidlom je v dôsledku separácie prúdenia zrejмый pokles tlaku v porovnaní s tlakom pred vozidlom. Tento rozdiel generuje primárnu zložku odporovej sily – tlakový odpor. Rozdiel tlakov nad a pod vozidlom, presnejšie menší celkový tlak nad vozidlom, spôsobuje vztlak a nerovnomerné rozloženie vztlaku medzi nápravami má za následok klopiači moment.



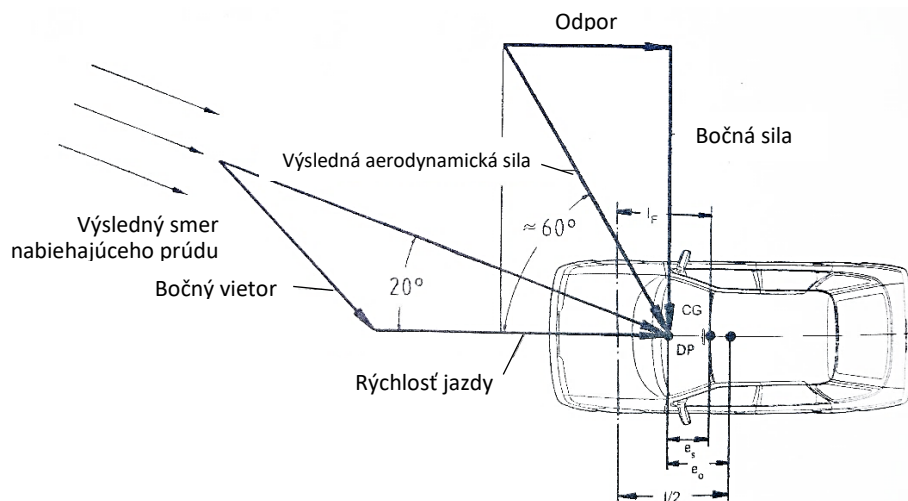
Obr. 2.6: Rozloženie koeficientu tlaku po 2D tvare automobilu [3]

Pôsobením bočného vetra a počas predbiehajúcich manévrov je prúdenie v okolí vozidla nesymetrické. Dochádza preto k nesymetrickému rozloženiu tlaku v horizontálnej rovine (obr. 2.7, úroveň rezu vo výške svetlometov). Ako výsledok vysokej lokálnej rýchlosti sa na prednej hrane v závetrí nachádza oblasť negatívneho tlaku, ktorá siaha až do miest A-stĺpiku, zatiaľ čo z ofukovanej strany v tej oblasti pozorujeme tlak vyšší. V zadnej časti vozidla je opäť nižší tlak v závetrí v porovnaní s ofukovanou stranou. Rozdiel tlakov na oboch stranách má za následok laterálnu (bočnú) silu a zatačavý moment, ktorý možno rozložiť na bočné sily pôsobiace na prednú a zadnú nápravu. U moderných vozidiel, je pri bočnom vetre laterálna sila na prednej náprave významne väčšia ako na zadnej, čo je ekvivalentné zatačavému momentu, ktorý má tendenciu točiť vozidlo „z vetra“. [1]



Obr. 2.7: Rozloženie tlaku v horizontálnej rovine vozidla [1]

Smer prúdenia relatívneho k pohybu vozidla a smer výslednej aerodynamickej sily nie sú rovnaké (obr. 2.8). Zatačavý uhol Ψ (na obrázku 20°) je menší ako uhol medzi smerom jazdy a výslednou aerodynamickou silou. Pri silnom bočnom vetre môže byť bočná sila väčšia ako odpor. [1]



Obr. 2.8: Výsledné sily a momenty pod vplyvom bočného vetra [1]

Pri výpočtoch dynamiky vozidla môže byť zatačavý moment reprezentovaný bočnou silou pôsobiacou v špecifickom bode (stred tlaku) vo vzdialenosti e_0 od stredu rázvoru. Pre túto vzdialenosť sa dá stanoviť vzťah:

$$e_0 = \frac{c_N \cdot l}{c_Y} \quad (2.3)$$

kde c_N je koeficient zatačavého momentu, c_Y koeficient bočnej sily a l rázvor. Vzdialenosť e_s , a síce vzdialenosť stredu tlaku od ťažiska vozidla je najdôležitejšia z hľadiska smerovej stability:



$$e_s = e_0 - \left(\frac{l}{2} - l_F \right) \quad (2.4)$$

Pričom l_F značí vzdialenosť prednej nápravy a ťažiska (obr. 2.8).

Malá vzdialenosť medzi stredom tlaku a ťažiskom znamená malý zatačavý moment.

Kloniaci moment má iba obmedzený efekt na smerovú stabilitu. Či je významný závisí od charakteristík podvozku. Je ale pravidlom, že menší kloniaci moment zlepšuje správanie riadenia pri bočných poryvoch. [1]

2.3 Aerodynamika výkonných vozidiel

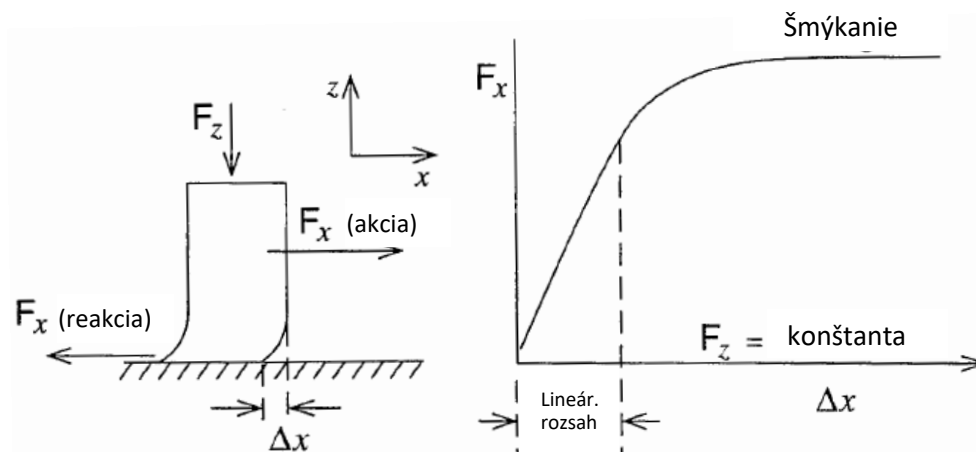
Výkonné vozidlá sú primárne charakterizované vysokým špecifickým výkonom, resp. pomerom výkonu a hmotnosti. Silná akcelerácia, schopnosť extrémneho spomalenia, výborná manévrovateľnosť v kombinácii s vysokou maximálnou rýchlosťou sú životne dôležité požiadavky u športových a závodných automobilov. [1]

Vozidlo, ktorému sa táto práca venuje, nie je určené pre závodné účely ani jazdu veľmi vysokými rýchlosťami (> 130 km/h). Avšak jeho špecifická koncepcia a účel ho predurčuje zdieľať aerodynamické prostriedky so športovými a závodnými automobilmi. Spomenutá koncepcia je popísaná v kapitole 3.

Aerodynamické sily majú efekt na výkonnosť vozidla priamo, ako v prípade odporu, alebo nepriamo, keďže vplyvom vztlaku alebo **záporného vztlaku – prítlaku** dochádza k zmene koeficientu trenia pneumatík. Aby bolo možné porozumieť aký dopad majú aerodynamické sily na chovanie vozidla, sú ako prvé prezentované parametre ovplyvňujúce výkonnosť pneumatík. [3]

2.3.1 Rola pneumatík, prítlčná sila

Obr. 2.9 popisuje jednoduchý experiment, pri ktorom je flexibilný materiál, ako napríklad guma, pritlačovaná k povrchu. Normálová sila F_z je konštantná. Postupne je zvyšovaná sila F_x (akcia), z čoho vzniká deformácia Δx v blízkosti kontaktu dvoch povrchov. V rovnakom okamihu pôsobí „cesta“ na materiál totožnou reakčnou silou F_x (reakcia) v opačnom smere. [3]



Obr. 2.9: Závislosť medzi silou a deformáciou flexibilného materiálu [3]

Podstatnou je práve reakčná sila F_x . Graf na obr. 2.9 znázorňuje, že podobne ako u pružiny dochádza najskôr k lineárnej závislosti deformácie a reakčnej sily. Pri vyššej deformácii dochádza ku šmýkaniu. [3]

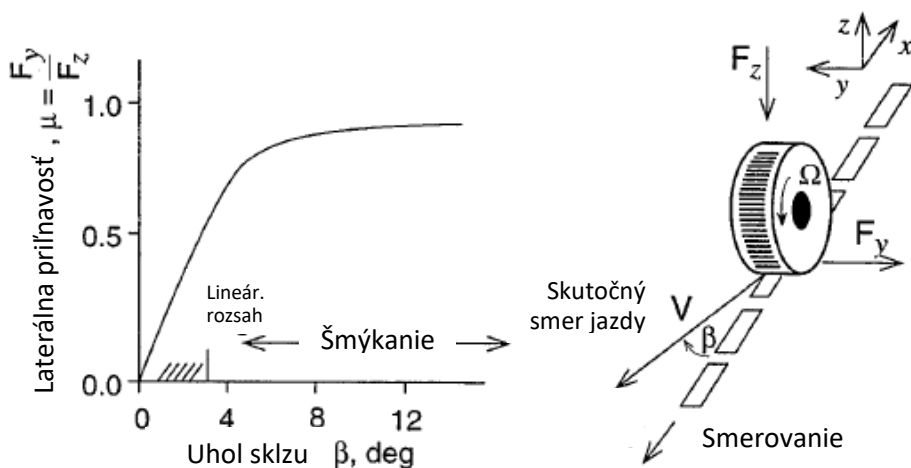
Pomer medzi silou paralelnou k zemi a normálovou silou je veľmi podstatný parameter, preto sa udáva tzv. koeficient priľnavosti μ :

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (2.5)$$

Maximálny podiel týchto dvoch síl označujeme ako koeficient trenia μ_{\max} . [3]

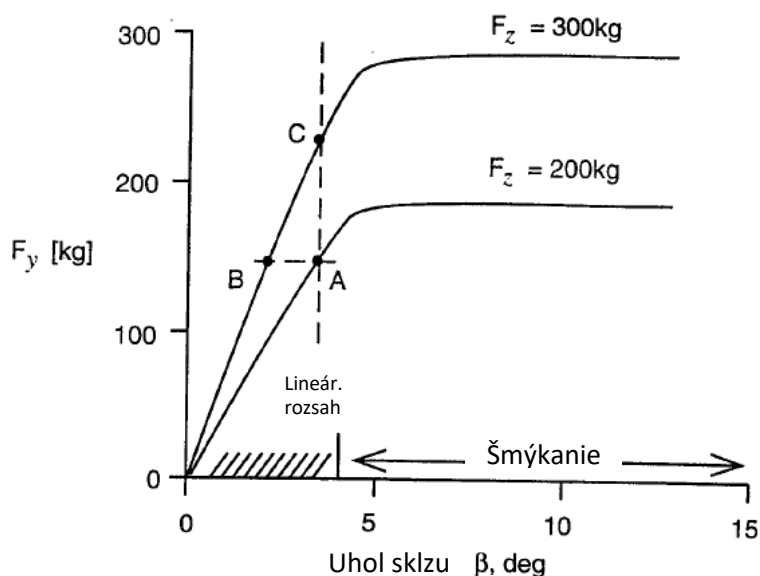
Z uvedených poznatkov je možné tvrdiť, že aby pneumatika prenášala sily, musí sa deformovať, a v istej úrovni deformácie musí dochádzať k preklzu. Preklz (anglicky slip) popisuje (obvykle v percentách) rozdiel medzi rýchlosťou pneumatiky a vozovky. Existujú dva hlavné prípady – pozdĺžny a bočný preklz. [3]

Pozdĺžny preklz je relevantný pri akcelerácií a brzdení. V zákrute vzniká bočný preklz pneumatiky. Ten zapríčiňuje, že skutočný smer jazdy (vektor V) je voči smerovaniu pootočený o uhol β (obr. 2.10). Krivka v tomto diagrame popisuje postupný nárast bočnej sily F_y , ak je normálová sila F_z konštantná. V praxi by mala pneumatika operovať v lineárnom rozsahu. Vtedy je reakcia vozidla na zásah do riadenia predvídateľná. [3]



Obr. 2.10: Závislosť bočného koeficientu priľnavosti pneumatiky na bočnom preklze [3]

Vplyvom aerodynamického vztlaku, resp. prítlaku sa môže normálová sila pôsobiaca na pneumatiku meniť. Obr. 2.11 porovnáva závislosť bočnej sily F_y a preklzu, kde jedna krivka reprezentuje normálovú silu $F_z = 200$ kg a u druhej je predpokladané navýšenie tejto sily o 50% vďaka aerodynamickému prítlaku. Z porovnania sú zrejmé dva fakty. Pri väčšej normálovej sile môže byť vygenerovaná rovnaká bočná sila za prítomnosti výrazne menšieho preklzu. To znamená, že vozidlo s prítlakom bude v tomto režime šetrnejšie k pneumatikám – zníži sa ich ohrievanie trením (preklzom). Na druhej strane, ak sa vyžaduje maximálny výkon, bod C (obr. 2.11) poukazuje na stav s rovnakým preklzom ako v bode A, lenže vtedy vozidlo s aerodynamickým prítlakom zatáča rýchlejšie (alebo zabrzdí skôr pokiaľ je uvažovaný pozdĺžny preklz). [3]

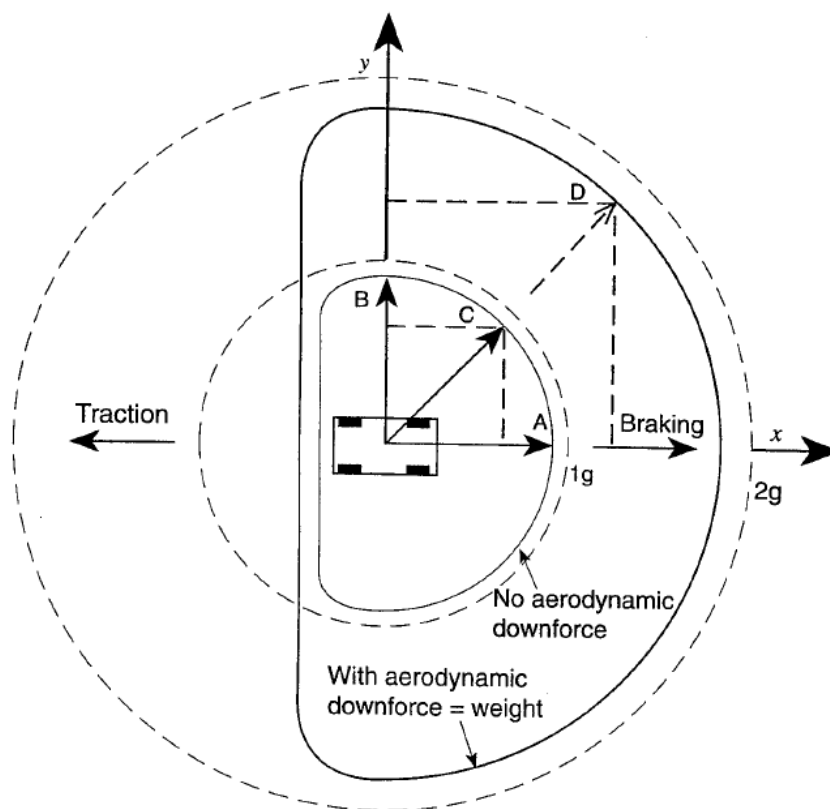


Obr. 2.11: Závislosť bočnej sily pneumatiky na uhle preklzu pri rôznych normálových silách [3]

Vplyv aerodynamického prítlaku na výkonnosť vozidla počas kombinovaného bočného a pozdĺžneho preklzu je možné zreteľne zobrazit' na polárnom G – G diagrame (obr. 2.12). Vozidlo sa nachádza v strede diagramu, okolité sústredné kružnice označujú veľkosť zrýchlenia v zmysle násobkov gravitačného zrýchlenia ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) (z inžinierskeho hľadiska priamo súvisí z koeficientom priľnavosti μ). Krivky v tvare D popisujú limity vozidla v zmysle brzdenia (braking, +x), zrýchlenia (traction, -x) a bočného zrýchlenia (+y, -y). [3]

Krivka „no aerodynamic downforce“ reprezentuje obálku maximálnych výkonov pre vozidlo bez aerodynamického prítlaku (alebo v nízkych rýchlostiach). Hodnoty tiež indikujú, že na strane zrýchlenia (trakcie) je limit o mnoho nižší než pri brzdení a zatáčaní, pretože v drvivej väčšine prípadov dokáže hnacia sila vyprodukovať hodnoty zrýchlenia iba hlboko pod 1g. [3]

Krivka „with aerodynamic downforce = weight“ znázorňuje situáciu kedy je normálové zaťaženie pneumatiky dvojnásobné pôsobením prítlaku. Ako vyplýva z bodu D, vozidlo dokáže zatočiť rýchlejšie a tiež je účinnejšie na brzdách. Vyplýva z toho, že pomoc aerodynamického prítlaku v rámci výkonnosti pneumatík je veľmi výrazná. [3]

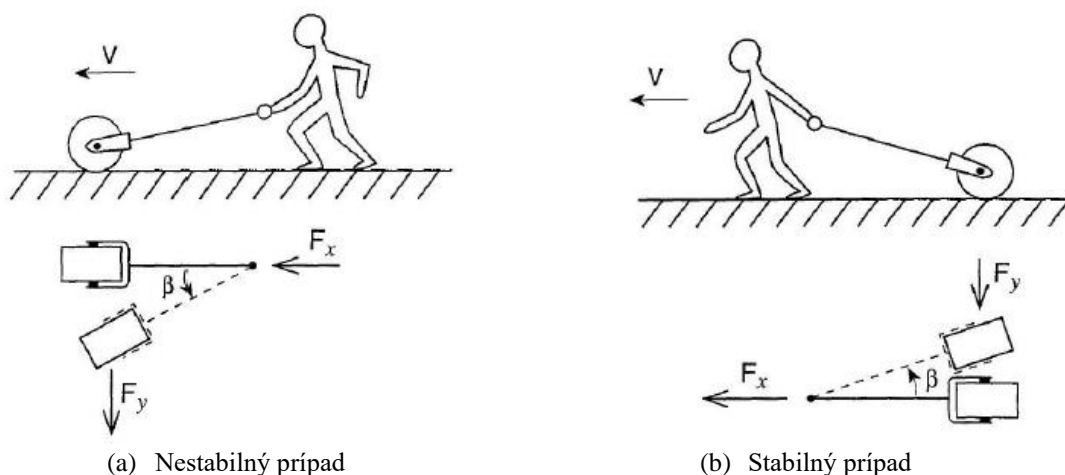


Obr. 2.12: G-G diagram [3]

2.3.2 Vplyv aerodynamických síl na dynamiku vozidla

Aerodynamické sily majú veľký vplyv na dynamiku vozidla. Najmä pri vysokých rýchlostiach začína byť účinok týchto síl na ovládanie a stabilitu veľmi významný. Tak ako u profilu krídla aj u auta sledujeme pozíciu aerodynamického stredu (stred tlaku), to znamená miesta, kde je možné aerodynamické zaťaženie nahradiť silami a moment je nulový. Presnejšie povedané, sledujeme polohu aerodynamického stredu vzhľadom k ťažisku. [6]

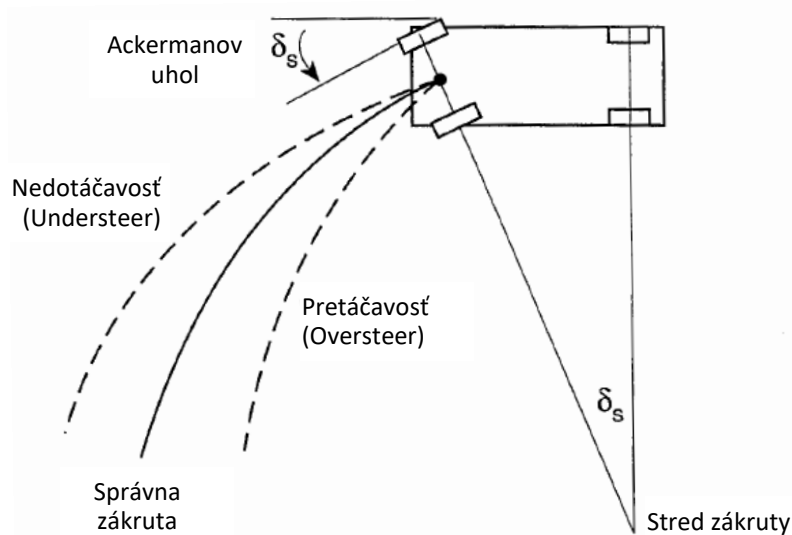
Čím väčšie sú rýchlosti, ktorými sa vozidlo pohybuje, tým dôležitejšia je vzájomná poloha ťažiska a stredu tlaku. Dva možné prípady sú analogicky zjednodušené na obr. 2.13. Prípady na obr. 2.13a zobrazuje stav, kedy je stred tlaku pred ťažiskom. V takom prípade bočná sila, ktorá pôsobí v aerodynamickom strede, vytvára moment k ťažisku, ktorý má tendenciu ďalej vychýliť vozidlo okolo vertikálnej osi. V opačnom prípade, kedy je aerodynamický stred za ťažiskom (obr. 2.13b), vznikajúci moment vracia vozidlo do priameho smeru a tým sa zachová stabilita. [6]



Obr. 2.13: Analógia silového pôsobenia na automobil vo vysokých rýchlostiach [6]

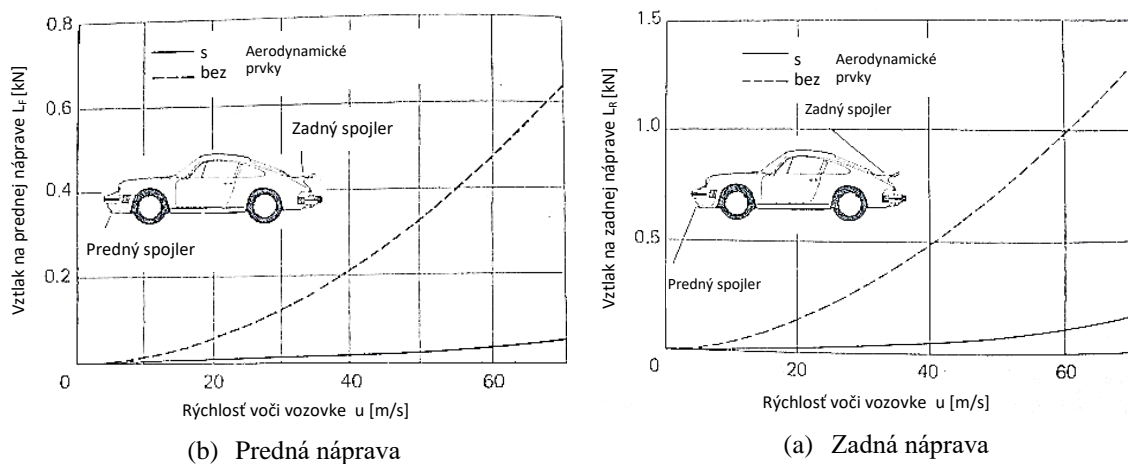
V pretekárskej sfére má vzájomná poloha ťažiska a aerodynamického ešte podstatnejší význam. Je daná použitými aerodynamickými prvkami a veľkosťou prítlaku, ktorý generujú. Väčšia normálová sila bude pôsobiť na pneumatiky nápravy, ku ktorej je stred tlaku bližšie.

To spolu s vplyvom presunu hmoty a usporiadaním podvozku určuje zmenu polomeru zatáčania (obr. 2.14). Pokiaľ je výrazne väčšie zaťaženie na zadných pneumatikách, vozidlo má tendenciu nedodáčať (understeer). Naopak môže byť pretáčavé (oversteer). Preto sa rozloženie prítlaku zásadným spôsobom podieľa na závodnej rýchlosti automobilov a monopostov.



Obr. 2.14: Geometria vozidla v zatáčke [3]

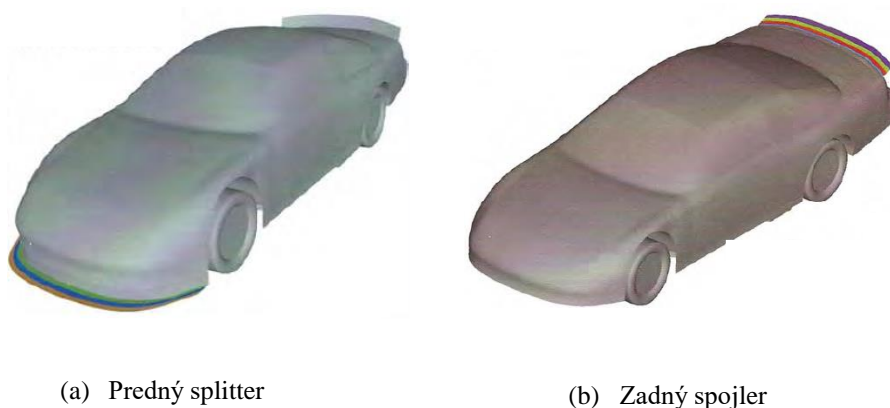
Testy prevedené H.-H. Braessom [7] ukázali, že redukováním vztlaku (obr. 2.15) je možné zlepšiť odozvu vozidla i počas jazdných manévrov. Test s automobilom Porsche 911 Carrera odhalil rýchlejšiu reakciu riadenia. Znížením vztlaku sa zlepšilo tiež brzdenie v zákrute, kde hrá dôležitú roľu príľnavosť pneumatík a ďalšie dynamické vlastnosti vozidla. Z počiatočnej rýchlosti 145 km/h automobil s aerodynamickými prvkami zastavil o 1s rýchlejšie. [1]



Obr. 2.15: Zreteľná redukcia vztlaku účinkom predného a zadného spojleru [1]

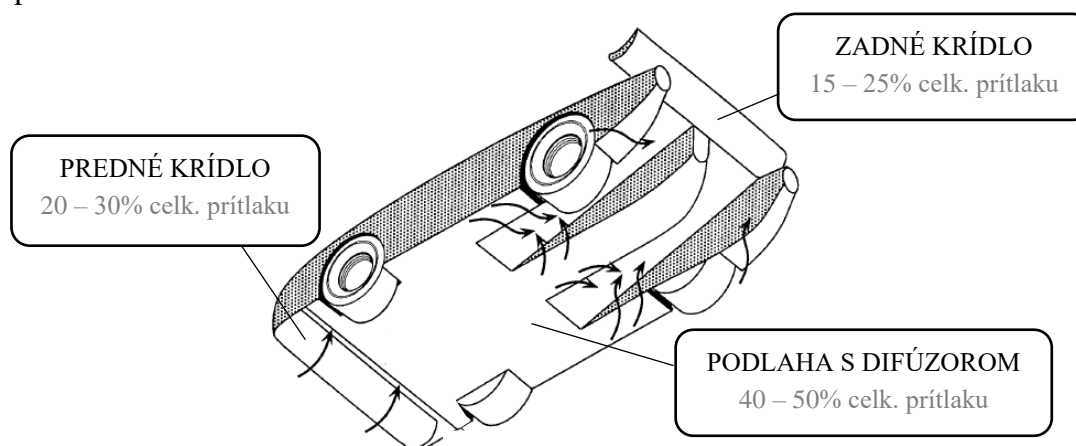
2.3.3 Generovanie prítlačnej sily

Existuje niekoľko druhov prostriedkov, ktorých cieľom je vytvárať prítlak. Ich komplexnosť a prevedenie závisí hlavne na kategórii vozidla, na ktorom sa nachádzajú. Aj u bežných cestných automobilov sú videné prvky ako splitter (obr. 2.16a) alebo spojler (obr. 2.16b). Tieto na prvý pohľad jednoduché plechové súčiastky dokážu pozitívne ovplyvniť výkonnosť a stabilitu a v neposlednom rade nie sú tak tvarovo citlivé ako prítlačné krídla, ktoré musia spĺňať prísnejšie kritéria a preto im je venovaná ďalšia podkapitola.



Obr. 2.16: Jednoduché aerodynamické prvky generujúce prítlačnú silu [8]

Pokiaľ sa jedná o závodný automobil typu enclosed-wheel, t.j. s kolesami skrytými pod blatníkmi, dajú sa u nich pozorovať tri hlavné prostriedky určené na generovanie prítlačnej sily (obr. 2.17). Už spomenuté prítlačné krídla v prednej i zadnej časti a v neposlednom rade podlaha s difúzorom, ktorá sa vo väčšine prípadov primárne podieľa na generovaní prítlaku aj vďaka blízkosti k zemi. Tento fenomén je objasnený v kapitole 2.3.3.2.

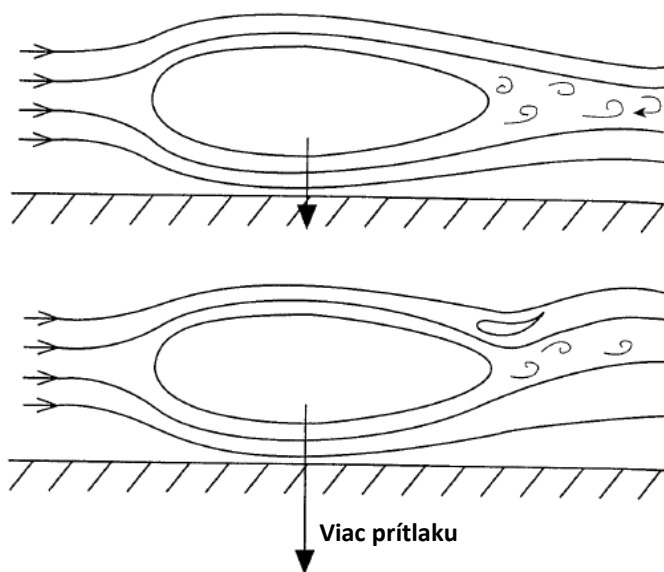


Obr. 2.17: Hlavné aerodynamické prvky závodných automobilov [3]

2.3.3.1 Prítlačné krídla

Okrem faktu, že krídla na závodných automobiloch sú oproti lietadlám zrkadlovo otočené existuje ešte niekoľko rozdielov. Automobilové krídla sú navrhované na veľmi špecifický operačný rozsah, na rozdiel od lietadiel, ktoré čelia veľkému počtu režimov z hľadiska rýchlosti, uhlu nábehu a vychýlenia vztlakových mechanizmov. Takže z aerodynamického hľadiska by mal byť návrh krídla na automobil jednoduchší. Tiež vplyv Reynoldsoveho čísla získava dôležitosť až pokiaľ existuje značný rozsah rýchlostí na konkrétnej trati (napr. drag racing⁷), alebo pri simulácii zmenšených modelov v aerodynamickom tuneli. [3]

Zanedbaná nemôže byť ani interakcia prúdenia v okolí krídel zo zvyškom karosérie. K jednej z najväčších dochádza pri zakomponovaní zadného krídla na automobil z hladkým spodným povrchom (podlahou). Schematický popis tohto efektu na prúdové pole je na obr. 2.18. Ak sa vezme do úvahy elipsoid v blízkosti zeme, prúdenie je zvyčajne priľnuté k povrchu až na malú zónu separácie v zadnej časti. Pri zakomponovaní zadného prítlačného krídla prúd pod elipsoidom akceleruje ako výsledok podtlaku pod krídlom. Vyššia rýchlosť znamená väčší prítlak vyvolaný elipsoidom, ku ktorému sa pridáva prítlak generovaný samotným krídlom. [3]

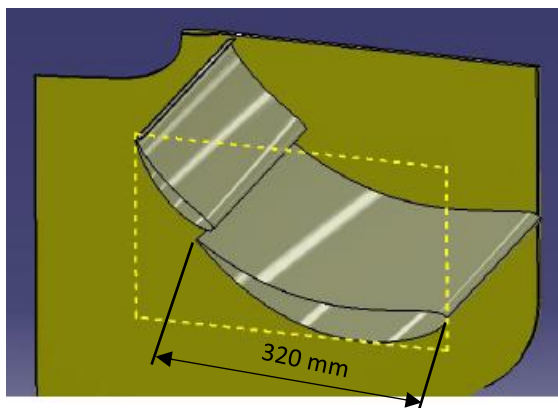


Obr. 2.18: Schematický popis efektu zadného krídla na prúdenie

Pokiaľ ide o tvar zadných prítlačných krídel, väčšinou sú aplikované profily s väčším zakrivením (camber) ako v letectve (obr. 2.19). Zvýšenie prítlaku je možné dosiahnuť tiež pridaním počtu elementov.

⁷ Typ motoršportu, v ktorom dva automobily alebo motocykle závidia na krátkej rovnej trati o prvenstvo v cieľovej rovinke. Najvýkonnejšie špeciály dosahujú rýchlostí cez 500 km/h.

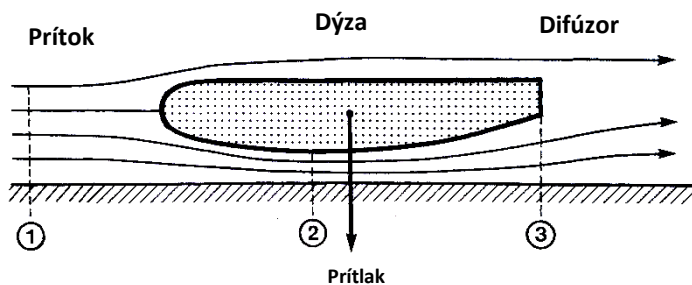
Prevažne sa ale v motoršporte stretávame s maximálne dvoj-elementovým krídlom. Je to i z dôvodu obmedzenia plochy krídla aj ďalších jeho parametrov pravidlami.



Obr. 2.19: Typická profiláž zadného krídla monopostu F1 s referenčným rozmerom [9]

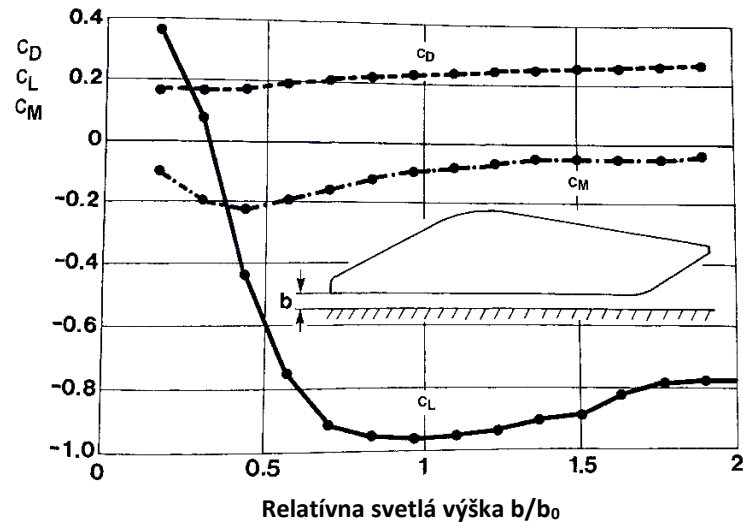
2.3.3.2 Prízemný efekt

Prízemný efekt využíva prúdenia medzi povrchom vozovky a spodnou stranou vozidla. Je založený na fakte, že vozovka a vhodne tvarovaná podlaha vozidla tvoria kombinovane dýzu a difúzor. Časť prúdenia je vedená pod automobil a urýchlená medzerou v tvare dýzy medzi zemou a podlahou. V zadnej časti – difúzore prúdenie spomaľuje naspäť na vstupnú rýchlosť. Ako je znázornené na obr. 2.20, redukcia tlaku a čiže hodnota prítlaku silno závisia na pomere veľkosti prierezov difúzora a dýzy. [1]



Obr. 2.20: Vznik prítlaku spôsobený prízemným efektom [1]

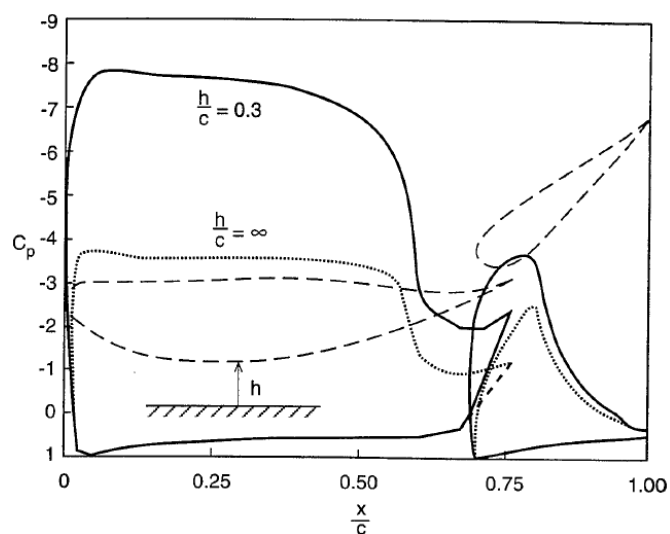
Objem prúdenia medzi zemou a vozidlom a teda najmä vertikálne sily výrazne závisia na vzdialenosti od zeme. Obr. 2.21 poukazuje na závislosť aerodynamických koeficientov na relatívnej svetlej výške b/b_0 . Veľmi malé svetlé výšky vyvolajú skôr vztlak, pretože tu môže dochádzať k interakciám medzných vrstiev a medzi podlahou a zemou neprúdi takmer žiaden vzduch. V istom rozmedzí svetlých výšok vzniká pod vozidlom podtlak, čo spôsobí zníženie celkového vztlaku. Pri ďalšom navyšovaní svetlej výšky účinok prízemného efektu klesá. [1]



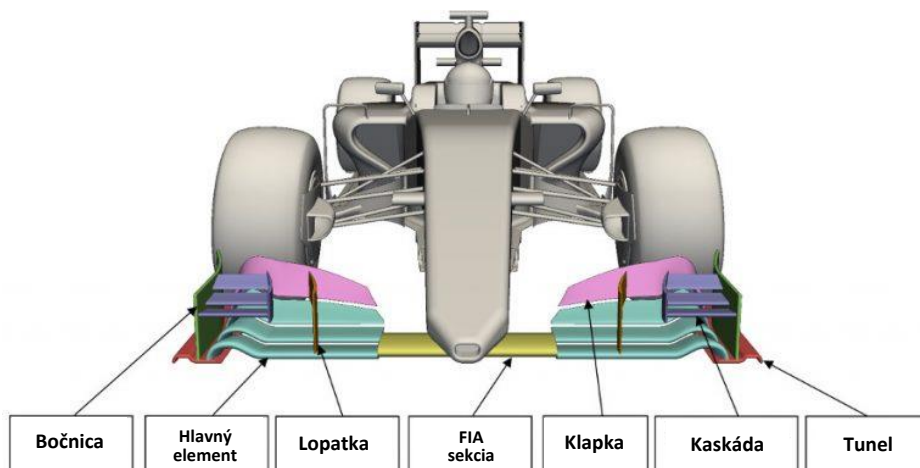
Obr. 2.21: Závislosť aerodynamických koeficientov na svetlej výške [1]

Prízemného efektu využíva aj predné prítlačné krídlo. To býva väčšinou ofukované nerozrušeným prúdením (podobne ako u lietadla), pretože sa nachádza pred prednou nápravou. Ďalej jeho fungovanie výrazne ovplyvňuje prítomnosť predných kolies. Účinok prízemného efektu na rozloženie tlaku po profiloch je na obr. 2.22. Za všimnutie stojí výrazné zvýšenie podtlaku na spodnej strane krídla, kdežto tvar rozloženia tlaku ostáva rovnaký. [3]

Pôdorysný tvar predných krídel bol až do nedávna iba obdĺžnikový, s čo najväčším možným rozpätím. Avšak ako čas plynul, bol objavený vplyv predného krídla na ostatné časti vozidla. Najmä u monopostov typu F1 – s odkrytými kolesami. Tam má predné krídlo efekt na chladenie motora, brzd, a v podstate distribúciu prúdenia po zvyšku monopostu. Príklad takého krídla je na obr. 2.23.



Obr. 2.22: Vplyv svetlej výšky predného prítlačného krídla rozloženia tlaku po profiloch [3]



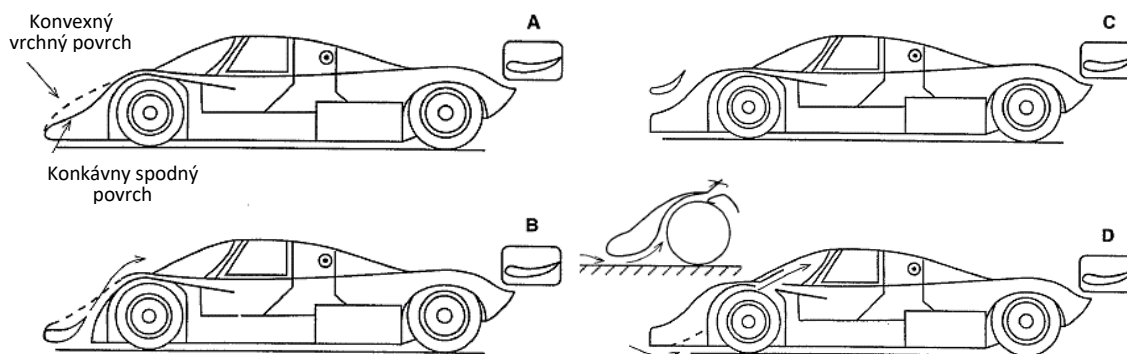
Obr. 2.23: Typický tvar predného krídla monopostu F1 [13]

Pri závodných automobiloch typu enclosed-wheel (kolesá skryté pod blatníkmi; prototypy alebo pretekárske sedany) nepozorujeme tak komplexné krídla ako na monopostoch. Prístupov, ako generovať prítlak na prednej náprave je niekoľko (obr. 2.24). Ak pod vozidlo prúdi dostatočné množstvo vzduchu, prúdenie akceleruje pod nosom automobilu podobne ako okolo nábežnej hrany profilu. Úprava tvaru vrchnej časti nosu na konkávny tento efekt znásobuje (obr. 2.24a). [3]

Tiež je možné pred nosovú časť umiestniť legitímne krídlo (obr. 2.24b). Vtedy obvykle krídlo funguje dobre, ale môže odvádzať prúdenie od podlahy s difúzorom čím redukuje jej účinok.

Najjednoduchší spôsob zakomponovania predného krídla je umiestnenie nad nosom vozidla (obr. 2.24c). V tomto prípade však jeho prítlak klesá a pri istej vzdialenosti od povrchu vozidla sa úplne ruší, ostáva iba odpor.

Ďalšou alternatívou, obvykle viditeľnou u závodných automobilov vyvinutých z cestných je variácia predného krídla zobrazená na obr. 2.24d. Spodná časť nosu je tvarovaná ako profil, lenže prúd vzduchu je vedený okolo predných kolies a väčšinou ústí vo vrchnej časti blatníka. Klapka na vrchu blatníku môže pomôcť satiu prúdu avšak za cenu významného nárastu odporu. [3]



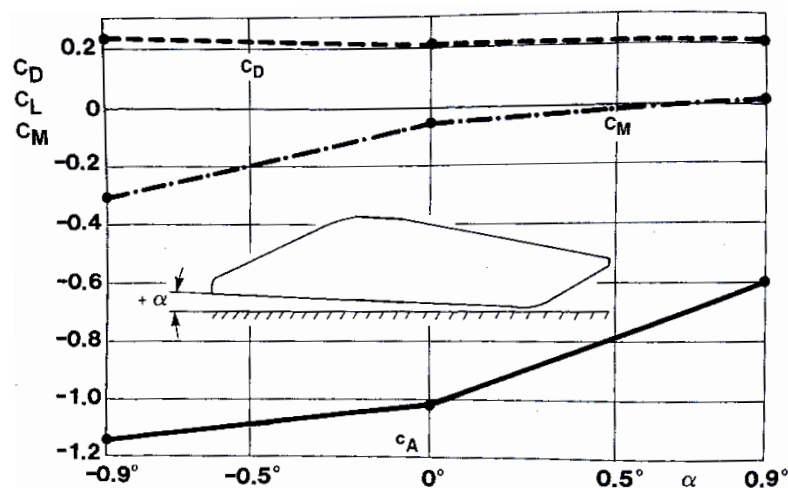
Obr. 2.24: Rôzne metódy generovania prítlaku na prednej náprave [3]

2.3.4 Vplyv uhlu náklonu

Doposiaľ boli rozhodnutia posudzované na základe predpokladu, že aerodynamické koeficienty sú konštantné. Avšak v skutočnosti sú výrazne závislé na relatívnej polohe vozidla voči zemi a na smere prúdenia. To znamená ich zmenu počas jazdných manévrov. Ako výsledok, aerodynamické sily a ich vplyv na riadenie kolísajú. [1]

Napríklad pri jazde cez hrebeň kopca spôsobí odskok prednej nápravy zvýšenie uhlu nábehu. To má za následok rast vztlaku na prednej náprave čo ďalej navyšuje efekt odskoku nápravy. [1]

Primárny vplyv má uhol náklonu na vztlak a jeho rozloženie čiže klopiači moment (obr. 2.25). Negatívny uhol zvyšuje prítlačnú silu za cenu minimálneho nárastu odporu. Je to výsledok urýchlenia prúdenia pod vozidlom. Pokiaľ je vozidlo vybavené predným krídlom, vďaka prízemnému efektu narastá prítlak, ktorý generuje a stred tlaku (viz kapitola 2.3.2) sa posunie dopredu. Tým pádom je u závodných automobilov uhol náklonu dôležitým parametrom pri nastavení vozidla na daný okruh.



Obr. 2.25: Závislosť aerodynamických koeficientov na uhle náklonu [1]



3 KONCEPCIA PROTOTYPU AIRCAR 5.0

Aircar 5.0 je najnovším návrhom lietajúceho automobilu dizajnéra Štefana Kleina, ktorý vychádza z vyše 25 ročnej skúsenosti. Množstvom prvkov nadväzuje na jeho prvotný projekt – AeroMobil. Cesta AeroMobilu sa začala už v roku 1990 v rámci diplomovej práce (obr. 3.1 naľavo) a vyústila až do súčasne vyvíjaného AeroMobilu 4.0 (obr. 3.1 napravo). Konkurenčný Aircar 5.0 však má byť dokonalejší vo všetkých smeroch. Jeho vizualizácia je na obr. 3.2, zväčšená je k nahliadnutiu v prílohe A.

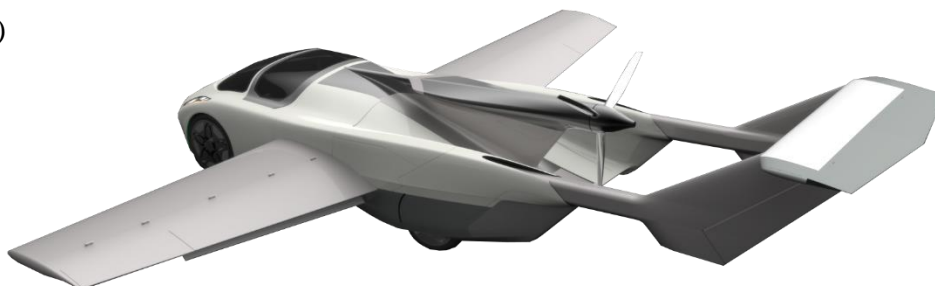


Obr. 3.1: Aeromobil 1.0 (naľavo) a Aeromobil 4.0 (napravo)

a)



b)



Obr. 3.2: Vizualizácia Aircaru 5.0

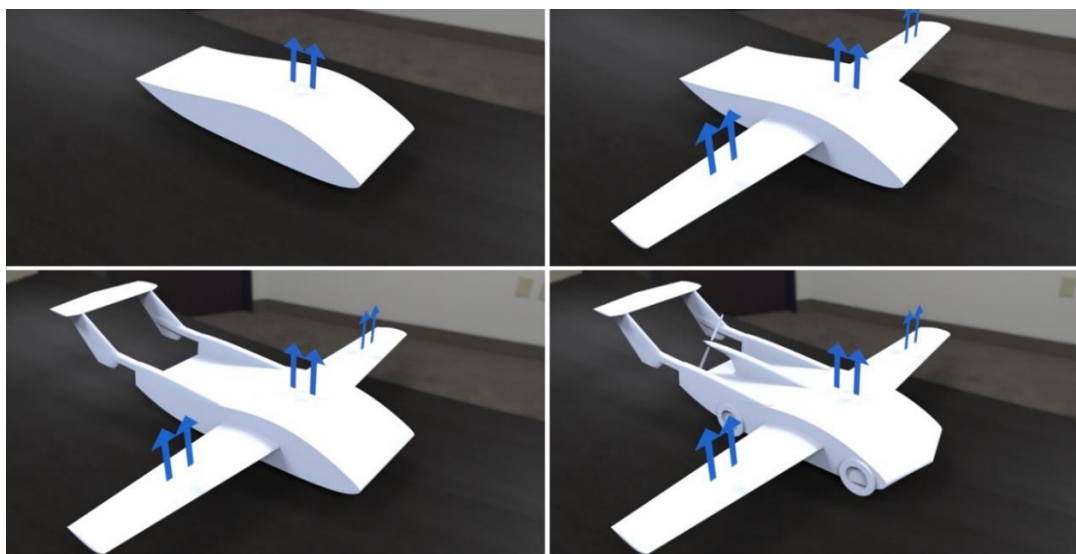
3.1 Aerodynamika

Inšpiráciu pre svoj vonkajší tvar vzal Aircar 5.0 u vozidla Tatra 77 vyrábaného v rokoch 1934 – 1938 (obr. 3.3). Tvar kabíny vychádza z tvaru leteckého profilu. V automobilovom priemysle bol v tých časoch tento tvar populárny. Využíval sa z cieľom redukovať aerodynamický odpor ale pri vyšších rýchlostiach nemal dobrý vplyv na jazdné vlastnosti (viz. kapitola 2).



Obr. 3.3: Tatra 77 [27]

To znamená, že vztlak negenerujú iba krídla ale v značnej miere aj kabína ako je znázornené na obr. 3.4. Podiel vztlaku generovaného kabínou je ešte umocnený vertikálnymi plochami v oblasti nad zadnými kolesami, ktoré pomáhajú izolovať oblasť nižšieho tlaku a tak zastávajú funkciu podobnú bočniciam



Obr. 3.4: Princíp generovania vztlaku Aircaru 5.0

Usporiadanie nosných plôch je ako u klasických letúnov, na vyváženie klopiaceho momentu slúži vodorovná chvostová plocha so symetrickým profilom rozčlenená na stabilizátor a výškové kormidlo. Ďalší prvok zakomponovaný kvôli redukcii vztlaku pri



jazde na vozovke je zasúvacie predné krídlo. Jeho návrh je jedným z predmetov výpočtovej časti práce.

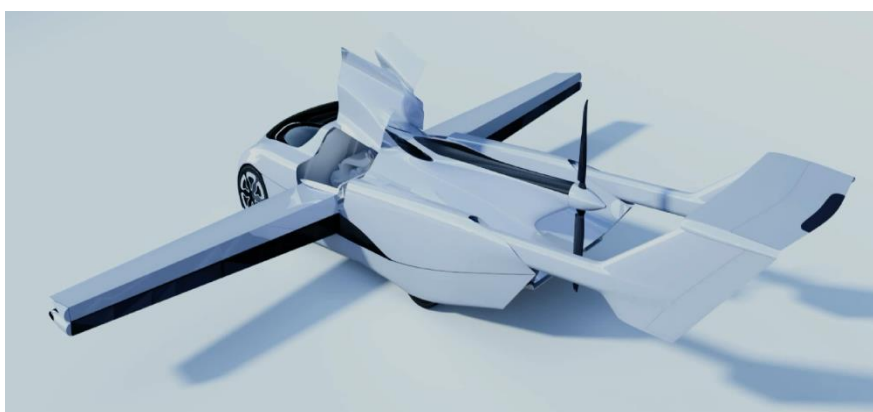
3.2 Transformácia

Jednou z pozoruhodných vlastností Aircaru 5.0 je spôsob akým sa dokáže transformovať z lietadlového režimu na automobil a späť. Oproti predchodcom tu došlo k výraznej zmene. Na rozdiel od AeroMobilu sa krídla nesklápajú na strechu stroja. Naopak, najprv sa pozdĺžne preložia, čím sa zmenšia ich rozmery a následne sú sklopené priamo do tela vozidla. Týmto spôsobom sa výrazne zmenší priestor, do ktorého zložené krídla zasahujú. Zároveň sa pri transformácii čiastočne zasúva „chvost“, čím sa skráti celková dĺžka stroja v móde jazdy na cestách. Nasledujúca sekvencia obrázkov vizualizuje spôsob transformácie z módu lietadla do módu automobilu.

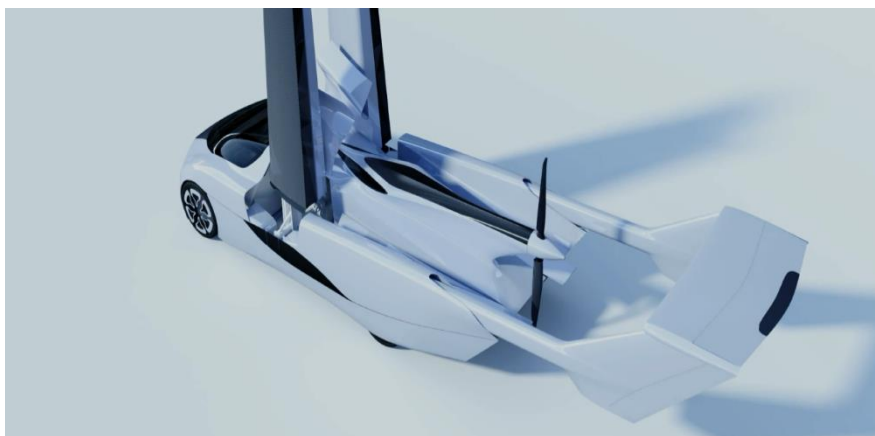
a)



b)



c)



d)



e)



Obr. 3.5: Transformácia z módu lietadlo do módu auto



4 METÓDY VÝSKUMU

Za predpokladu, že nie je vhodné testovať aerodynamické prvky počas premávky alebo v závode, existujú 3 základné metódy na určenie aerodynamických parametrov: jazdné skúšky, aerodynamický tunel a výpočtové metódy. Každá z nich má svoje výhody i nevýhody. Rozpočet a dostupnosť istých testovacích zariadení väčšinou určujú, ktorá metóda bude použitá pri vývoji konkrétneho vozidla. [3]

Dynamika prúdenia je komplikovaná, žiaden z uvedených nástrojov nie je dokonalý a preto sa často pri vývoji využívajú dva, dokonca všetky a výsledky sa porovnávajú. Obecne sa od týchto metód vyžadujú nasledujúce informácie:

- Aerodynamické koeficienty ako vztlak (na prednej/zadnej náprave), odpor, atď...
- Rozloženie tlaku na povrchu vozidla. Tieto údaje môžu pomôcť optimalizovať tvar vozidla.
- Údaje týkajúce sa vizualizácie prúdenia, napríklad prúdnice, z ktorých je možné určiť oblasť separácie prúdenia

[3]

4.1 Jazdné skúšky

Najväčšou výhodou jazdných skúšok je, že skutočné vozidlo je testované na skutočnej trati. Taktiež je možné okamžite vyhodnotiť efekt modifikácií napríklad na maximálnu rýchlosť alebo rýchlosť prejazdu konkrétnou zákrutou. Táto metóda najlepšie reprezentuje reálne prevádzkové podmienky. [3]

Na druhej strane, nevýhodou je nekontrolované prostredie (vietor, teplota) i iné meniace sa podmienky (reakcie vodiča, pneumatiky,...). Taktiež nie sú jazdné skúšky aplikovateľné v prvotných štádiách návrhu keďže reálne vozidlo ešte neexistuje. Ďalšou nevýhodou je cena. V niektorých kategóriách motoršportu je prevádzka vozidla veľmi nákladná. [5]

4.2 Aerodynamický tunel

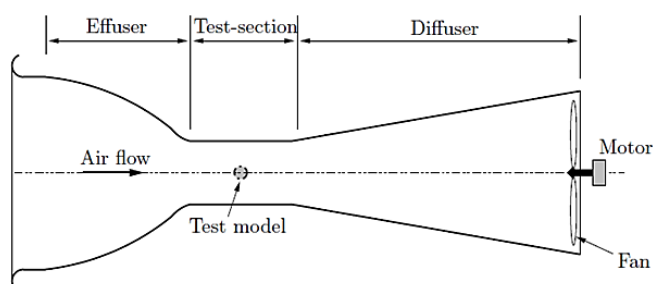
Základná myšlienka aerodynamického tunela je jednoduchá. Namiesto „naháňania“ pohybujúceho sa lietadla alebo automobilu meracím vybavením, testovaný model zostáva statický zatiaľ čo sa vzduch relatívne k nemu pohybuje. Tunely umožňujú kontrolu testovacích podmienok, ktoré sú nezávislé sa vonkajších atmosférických podmienkach.

Tento koncept sa môže javiť jednoduchý. Ukázalo sa však, že existuje množstvo spôsobov konštrukcie aerodynamického tunela a ešte väčšie množstvo problémov s nimi súvisiacich. [3]

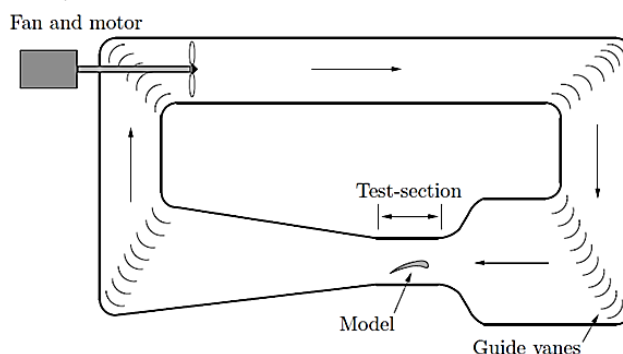
Existujú dva základné typy aerodynamických tunelov. Otvorený, tiež nazývaný Eiffelov typ (obr. 4.1a), má výhodu v relatívne nízkych nákladoch na výstavbu. Na druhej strane sú prevádzkové náklady vysoké. Pokiaľ je vzduch nasávaný z exteriéru, testovacie podmienky budú závisieť na počasi. Existuje niekoľko ďalších nevýhod tohto typu a preto sa v súčasnosti už nebuduje. [1]

Uzatvorený alebo Göttingenov typ (obr. 4.1b) má hlavnú výhodu v tom, že vyžaduje menší výkon na prevádzku. Avšak jeho zástavba je nákladnejšia. Taktiež je nutné kontrolovať teplotu vzduchu vo vnútri tunela, čiže nainštalovať tepelný výmenník. Vyplývajúce tlakové straty vedú k miernemu zníženiu úspor z hľadiska nižších prevádzkových nákladov. [5]

a) Otvorený (Eiffelov) typ



b) Uzavretý (Göttingenov) typ



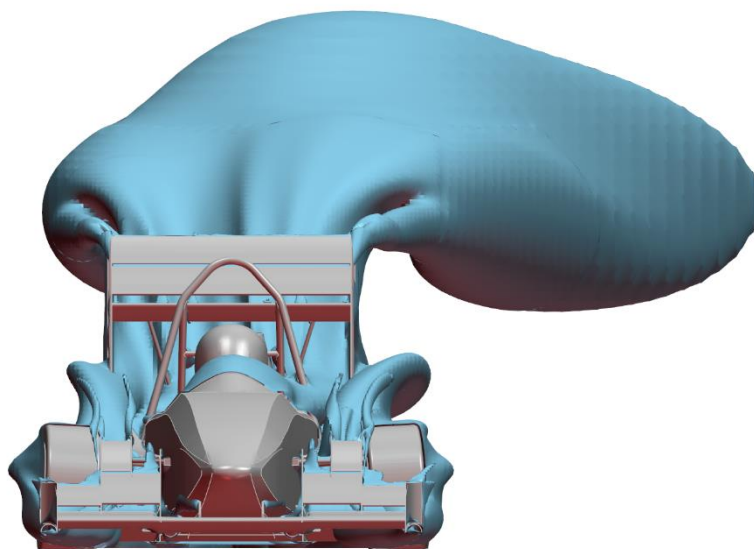
Obr. 4.1: Typy aerodynamických tunelov [12]

4.3 Výpočtové metódy

Výpočtová metóda nazvaná CFD (Computational Fluid Dynamics) nachádza od 90. rokov minulého storočia čoraz väčšie uplatnenie pri aerodynamickom vývoji automobilov a lietadiel. Svoje zastúpenie má aj pri riešení problémov hydrodynamiky a termodynamiky. Pochopiteľne najvýraznejší rozmach zaznamenala s príchodom superpočítačov. S výkonným hardwarom je totiž možné simulácie významne urýchliť a skúmať veľmi zložité fenomény týkajúce sa prúdenia. Aj preto sa momentálne vynakladá veľké úsilie na vývoj a zdokonaľovanie tohto nástroja.

Jeho najväčšou výhodou je možnosť využitia v počiatočných fázach vývoja, pred výrobou konkrétnej súčiastky alebo celého stroja. Tým pádom vývoj značne urýchľuje a v porovnaní s jazdnými skúškami a aerodynamickým tunelom je táto metóda významne lacnejšia.

CFD popisuje konkrétny fyzikálny jav matematicky a software využíva numerické metódy na analýzu konkrétneho prúdového poľa. Matematický model sa líši vzhľadom k problému, ktorý je pozorovaný (prenos tepla, fázová zmena, chemická reakcia,...). Avšak všeobecným matematickým základom takmer všetkých CFD analýz sú Navier-Stokesove rovnice.



Obr. 4.2: Ilustračný obrázok - Vizualizácia iso plôch pri prejazde zatáčkou monopostu Dragon 7 (Formula Student)

II. VÝPOČTOVÁ ČASŤ

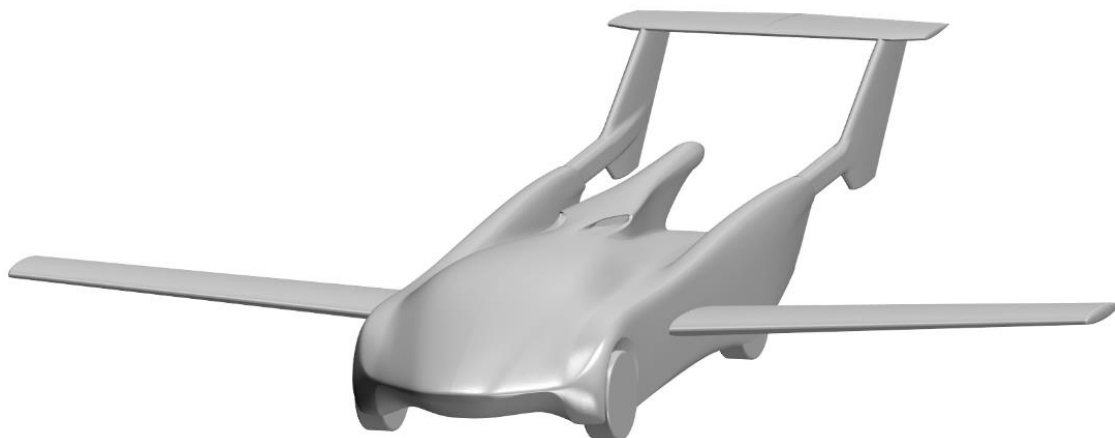
Táto časť práce sa venuje samotnému riešeniu danej inžinierskej problematiky – aerodynamickej analýze prototypu lietajúceho automobilu Aircar 5.0. K riešeniu je využitá výpočtová metóda CFD, konkrétne software STAR CCM+. Cieľom analýzy je kvantifikovať základné aerodynamické charakteristiky v jednotlivých režimoch, vyhodnotiť ich a odhaliť možné slabiny vyplývajúce z charakteru prúdového poľa pri cestnom režime Aircaru 5.0.

5 KALIBRÁCIA MATEMATICKÉHO MODELU

Aby bolo možné vzhliadať k výsledkom simulácií s dostatočnou dôveryhodnosťou, je nutné v prvom rade overiť výpovednú hodnotu výpočtov. To je možné dosiahnuť porovnaním výsledkov simulácií s odpovedajúcimi tunelovými meraniami alebo letovými (jazdnými) skúškami. V tomto prípade sa porovnávajú výsledky týkajúce sa letového módu prototypu. Referenčné hodnoty sú získané z letového merania polystyrénového modelu v mierke 1:1, resp. z merania charakteristík profilu v aerodynamickom tuneli (NASA Report).

5.1 Geometria & Sieť

Výpočtový model pozostáva zo zjednodušeného modelu prototypu Aircar 5.0 (obr. 5.1), v ktorom sú zakomponované všetky relevantné vonkajšie tvary. Zjednodušená je napríklad oblasť v okolí kolies. Jemnejšie kontúry a detaily sú odstránené – zbytočne zvyšujú počet buniek siete bez badateľného ovplyvnenia výsledku.

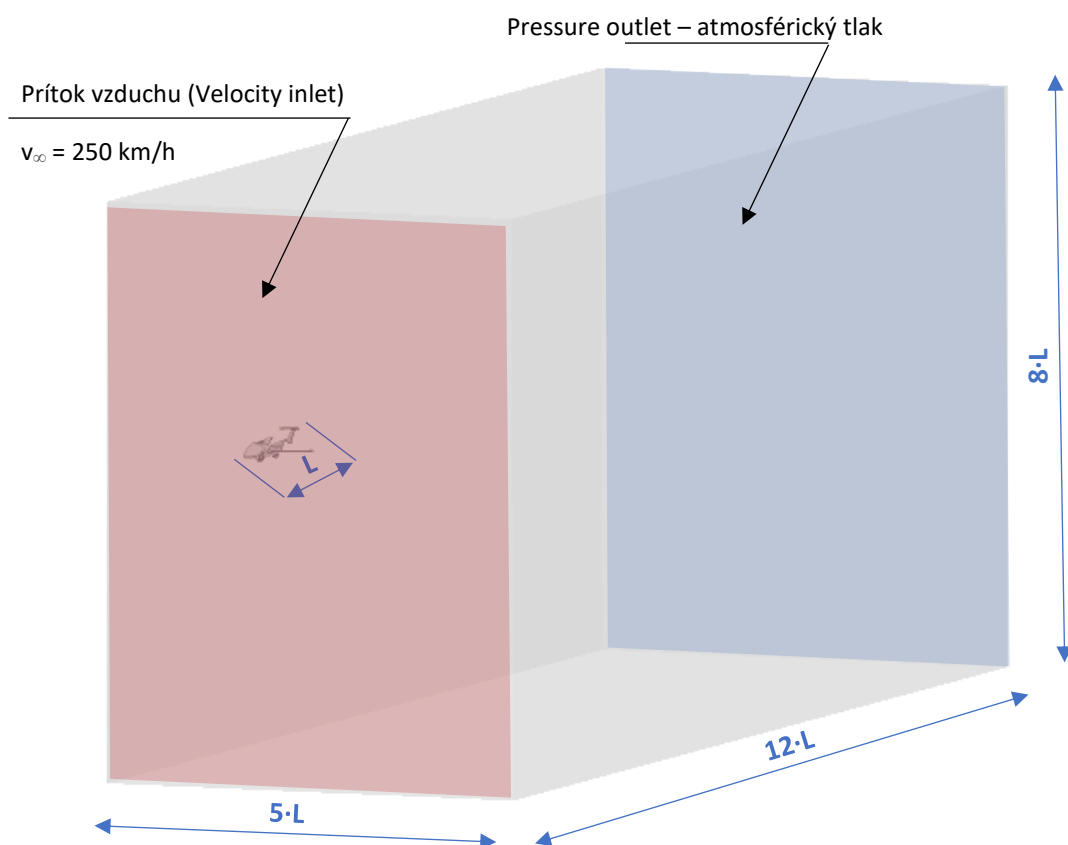


Obr. 5.1: Výpočtový model Aircaru 5.0 v letovom režime



Keďže sa jedná o simuláciu v priamom smere t.j. bez uhla vybočenia, dá sa model zjednotiť a využiť symetriu. To výrazne zníži výpočtový čas.

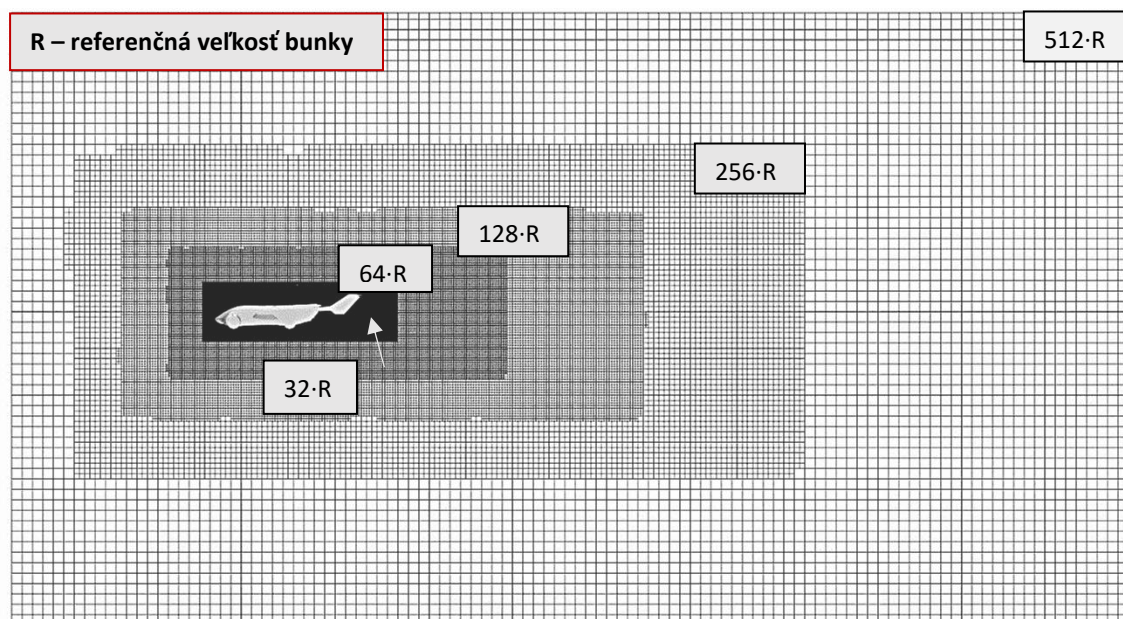
Celkový objem, v ktorom je sledované prúdenie je reprezentovaný doménou, v ktorej je umiestnený model Aircaru (obr. 5.2). Rozmery domény sú dostatočne predimenzované aby vzdialenosť stien neovplyvňovala tlakové pole. Najpodstatnejšou je dĺžka domény v smere prúdenia, kedy je treba dbať na úplav za „ofukovaným“ objektom.



Obr. 5.2: Výpočtová doména

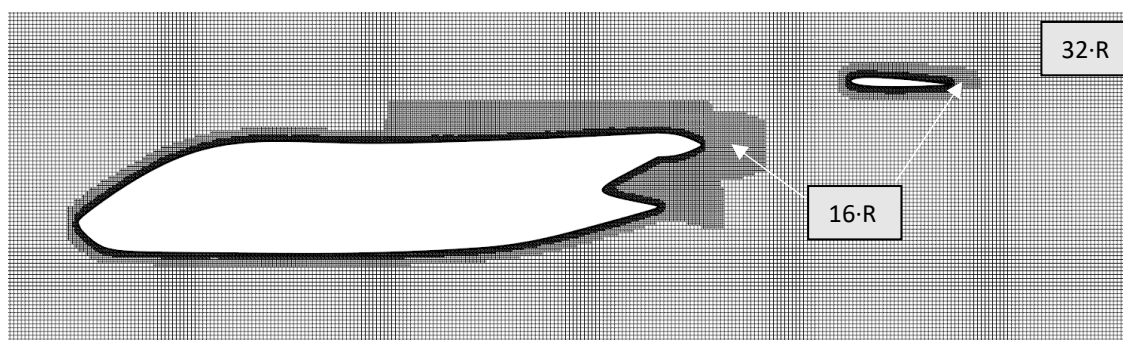
Použitá sieť je typu trimmed cell, to znamená tvorená zo šesťstenných buniek. Tento typ siete je vhodný v modeloch kde prevláda prúdenie v jednom smere. Tak je tomu aj v tomto prípade.

V blízkosti Aircaru je sieť najjemnejšia, s väčším odstupom rastie aj veľkosť buniek. Zóny s danými veľkosťami sú definované objemovými útvarmi a veľkosti v týchto útvaroch sú vždy násobkami jednej referenčnej hodnoty, ktorá bude predmetom pozorovania v ďalšej fáze kalibrácie (kapitola 5.2). Z charakteru trimmed cell siete vyplýva, že v mieste prechodu z danej veľkosti bunky do inej musí byť zmena veľkosti dvojnásobná t.j. o polovicu väčšia alebo menšia. Štruktúra siete znázornená na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Objemové rozčlenenie siete

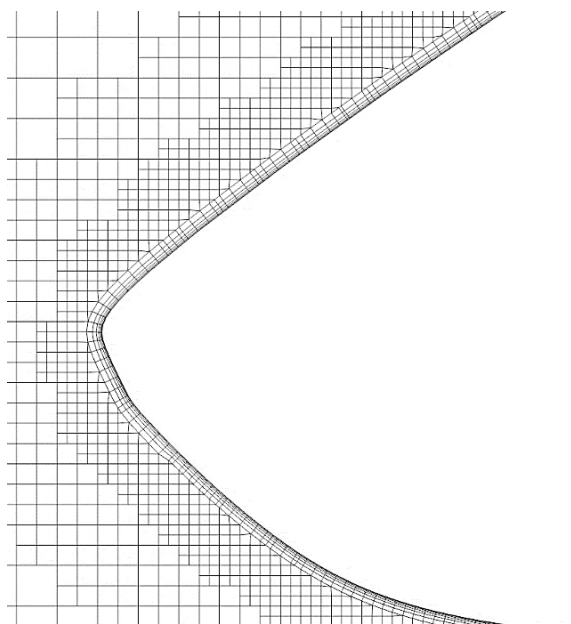
Ako vyplýva z obr. 5.3, v oblasti za Aircarom je väčší počet buniek z dôvodu prítomnosti výraznejších tlakových zmien spôsobených úplavom. V mieste predpokladu separácie prúdenia z vrtuľového pontónu a pri vedomí výskytu vírenia v okolí jeho vrchnej časti sú tieto miesta tiež ošetrené zjemnením siete (obr. 5.4). To platí aj pre blízke okolie krídla a vodorovných chvostových plôch.



Obr. 5.4: Oblasť zjemnenia siete v okolí vrtuľového pontónu a VOP (rez v rovine symetrie)

Prúdenie v blízkosti stien je modelované aplikovaním prizmatických vrstiev pomocou takzvanej stenovej funkcie (wall function). Tento prístup znižuje výpočtové nároky, keďže redukuje počet vrstiev buniek pri stene potrebnej na správny výpočet dejov v medznej vrstve, kde sa uplatňuje molekulárna aj turbulentná viskozita, t.j. medzi stenou a oblasťou plne vyvinutého turbulentného prúdenia. [10]

Náhľad na prizmatické vrstvy v rovine symetrie je na obr. 5.5.



Obr. 5.5: Prizmatické vrstvy v okolí nosu (rez v rovine symetrie)

Použitie stenových funkcií vyžaduje, aby stred bunky prvej vrstvy siete ležal v rozmedzí $y^+ = 30 - 300$ s preferenciou nižších hodnôt, pretože hrúbka turbulentnej vrstvy je premenlivá. Hodnota y^+ je bezrozmerná vzdialenosť medzi stenou a uzlom bunky v prvej prizmatickej vrstve. Je závislá na lokálnej šmykovej rýchlosti tekutiny v bunke siete. [10]

$$y^+ = \frac{\rho U_\tau \Delta y_1}{\mu} \quad (5.1)$$

Kde ρ je hustota vzduchu, U_τ je šmyková rýchlosť, Δy_1 nárast výšky ďalšej vrstvy a μ je dynamická viskozita. [10]

Keďže hodnota y^+ je kontrolovaná až pri post-processingu, bude správnosť prizmatických vrstiev v modeli vyhodnotená v kapitole 5.2.

Pre všetky kalibračné výpočty je okrajovou podmienkou vstupná rýchlosť $v_\infty = 250$ km/h. Výpočty prebiehajú v 0m MSA.

5.2 Model turbulencie & veľkosť buniek siete

Pozorovaný je vplyv zmeny turbulentného modelu na aerodynamické charakteristiky dvojrozmerného profilu *NASA/LANGLEY LS-0413* využíteho na krídle vozidla Aircar 5.0. Hodnoty sú porovnané s tunelovým meraním, ktorého výsledky sú sprostredkované v NASA Technical Paper 1498 [11].

Model turbulencie môže mať v istých oblastiach prúdového poľa zásadný vplyv na jeho charakter. Môže ísť napríklad o podcenenie/precenenie kritického uhlu nábehu. Pozorované sú v tejto sfére najpoužívanéjšie RANS modely: Realizable K- ϵ a SST K- ω .

Pri rýchlosti 250 km/h a hĺbke profilu 1,2 m (priemerná hĺbka lichobežníkového krídla Aircaru) sú počítané charakteristiky profilu pri $Re = 6 \cdot 10^6$. Na obr. 5.6 je zobrazená geometria profilu. Zámerne je z počiatku zvolená vysoká detailnosť výpočtovej siete. Podstatná je presnosť výpočtu a pri 2D úlohách je zvýšenie výpočtových nárokov relatívne zanedbateľné. Medzná vrstva je definovaná pomocou stenovej funkcie aby sa v tomto smere zachovali parametre 3D matematického modelu.



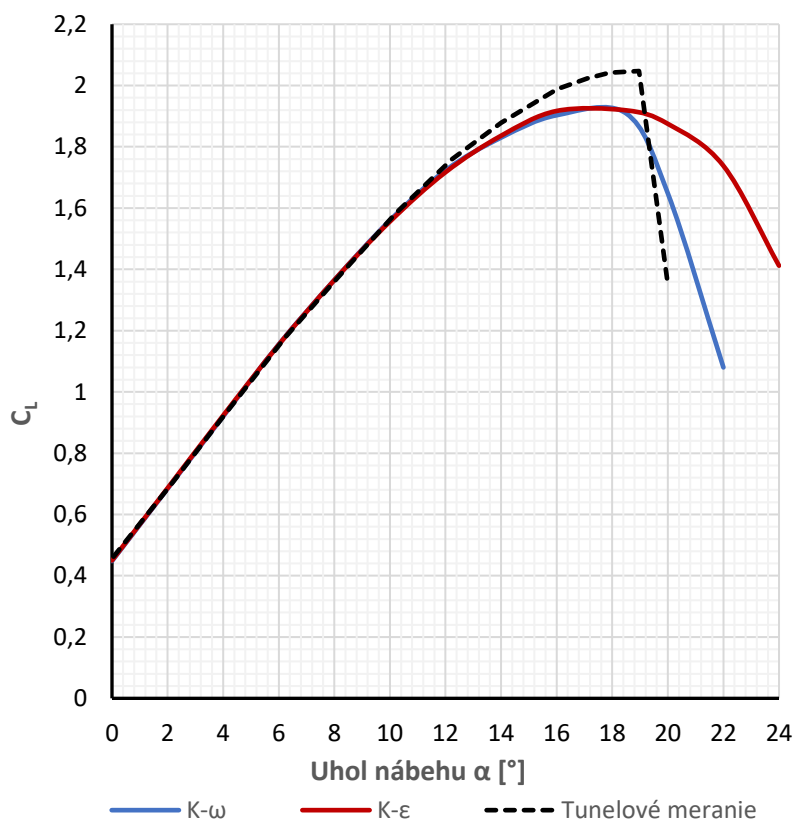
Obr. 5.6: Profil NASA/LANGLEY LS-0413

Obr. 5.7, resp. 5.8 vykresľujú vztlakové čiary a poláry spomínaných modelov turbulencie a tunelového merania.

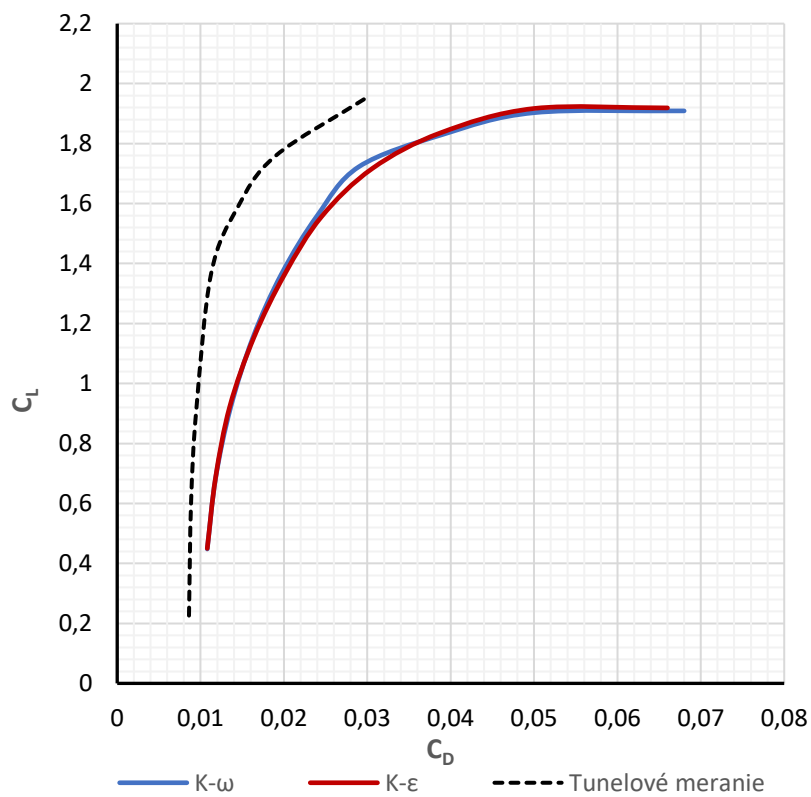
Vykreslené vztlakové čiary (obr. 5.7) sú v lineárnej časti takmer totožné. Nečakane vysoké sú odchýlky medzi jednotlivými turbulentnými modelmi pri vyšších uhloch nábehu ($\alpha > 12^\circ$). V prípade K- ϵ klesá vztlak po prekročení kritického uhlu nábehu pozvoľnejšie, ako ukazujú tunelové dáta, ktorým sa najviac blíži model K- ω , kde sa pri vyšších uhloch nábehu síce líši C_L o zhruba o 5%, avšak kritický uhol nábehu sa až na drobnú odchýlku (1°) zhoduje s tunelovým meraním.

Rozdiely hodnôt aerodynamických polár (obr. 5.8) z tunelového merania a CFD sú relatívne veľké. Vyplýva to z nie presného odhadu najmä trecej zložky odporu CFD nástrojmi. Priebeh jednotlivých polár je však podobný t.j. akceptovateľný.

Pri pohľade na jednotlivé závislosti sa javí ako najvhodnejší model **K- ω** . Preto bude použitý v ďalších fázach aerodynamickej analýzy. V tabuľke 5.1 je zhrnuté fyzikálne nastavenie matematického modelu.



Obr. 5.7: Vztlakové čiary profilu LS-0413



Obr. 5.8: Poláry profilu LS-0413

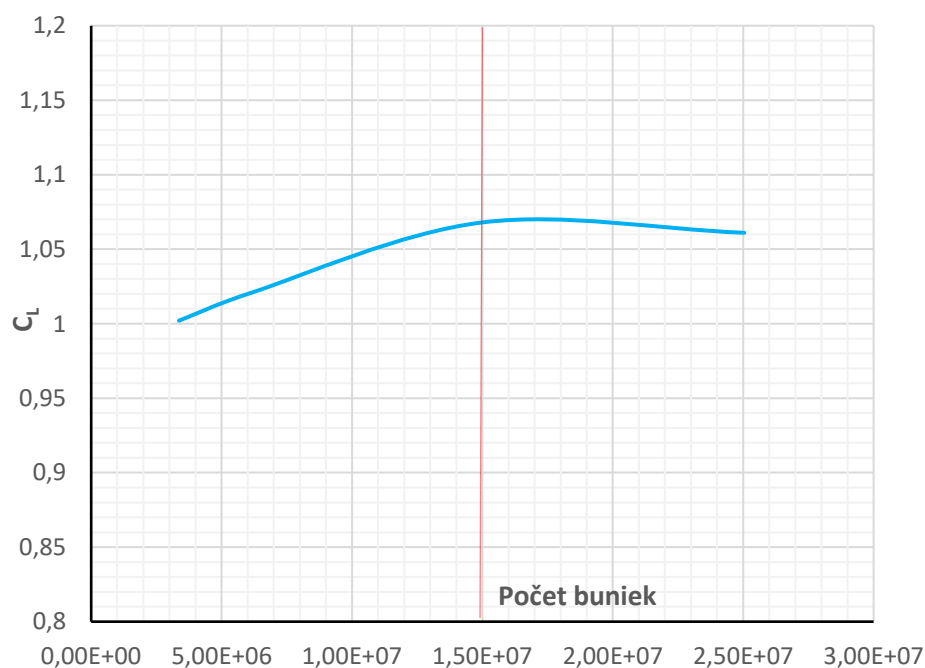
Tab. 5.1: Fyzikálne nastavenie matematického modelu

Time	Steady
Flow	Coupled Flow
Equations of State	Constant Density
Viscous Regime	Turbulent
Reynolds-Averaged Turbulence	K-Omega Turbulence
K-Omega Turbulence Models	SST K-Omega
K-Omega Wall Treatment	All y+ Wall Treatment

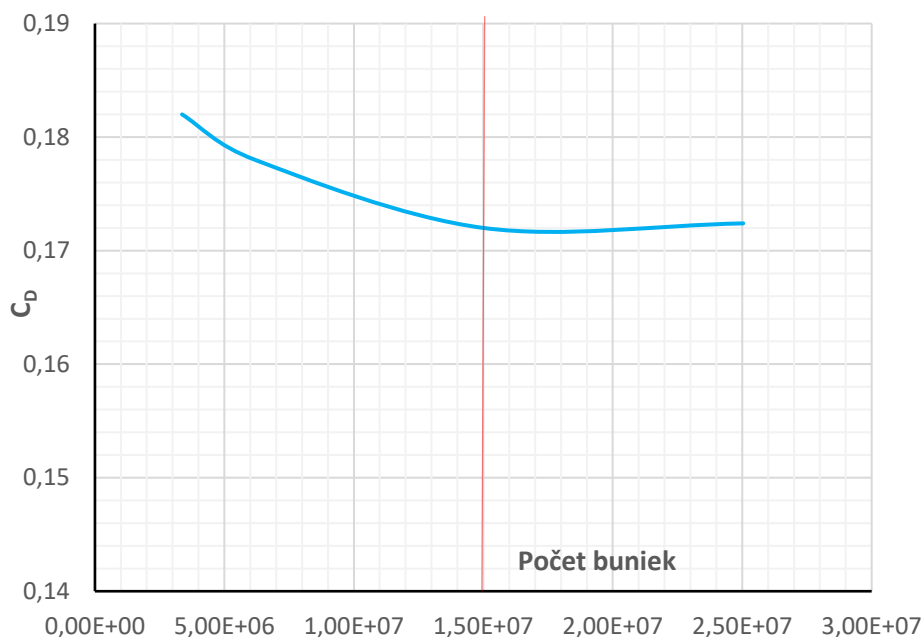
Veľkosť buniek siete

Optimalizácia tohto parametru je vykonaná na modeli Aircaru s uhlom nábehu $\alpha = 10^\circ$ pri použití už overeného turbulentného modelu K- ω . Tento uhol nábehu bol zvolený kvôli prítomnosti väčších tlakových gradientov, kde sa rozdiel veľkosti buniek prejaví výraznejšie. Táto myšlienka bola overená výpočtom.

Aby sa eliminovali možnosti výskytu nepresností výpočtu, je nutné zvoliť správnu referenčnú veľkosť bunky (viz strana 55). Dôležitosť sa tiež prikladá pomeru rýchlosti výpočtu (hardwarovej náročnosti) a presnosti. Z toho dôvodu nie je vhodná príliš detailná sieť. K tomuto účelu je zvolená metóda postupného zjemňovania siete až nedosiahne chyba sledovaných koeficientov (C_L a C_D) prijateľných hodnôt, v tomto prípade 0,5%. Výsledky sú interpretované na obr. 5.9 a 5.10.



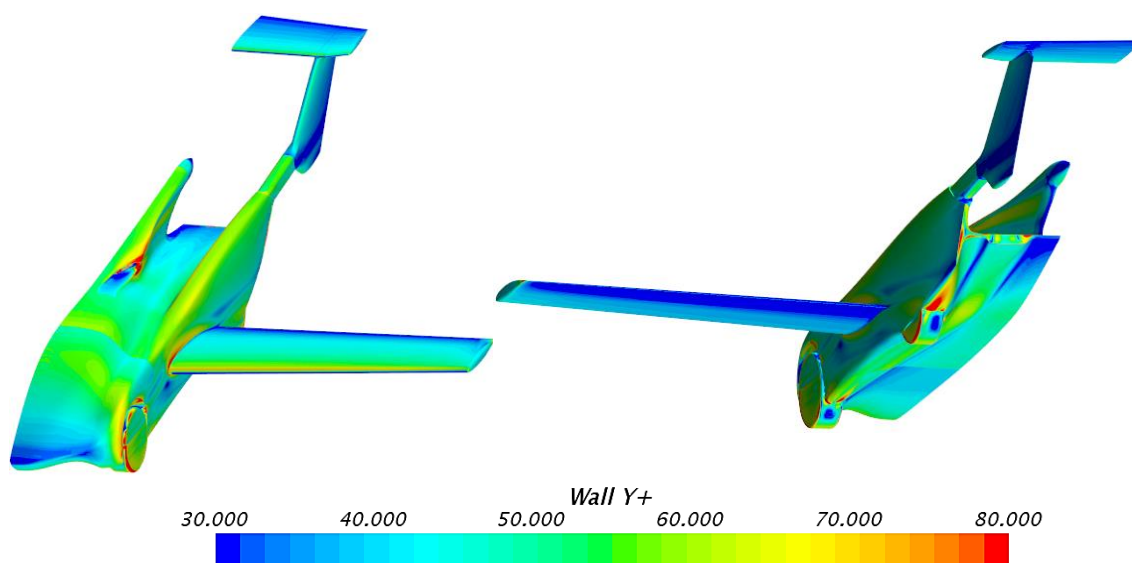
Obr. 5.9: Závislosť koeficientu vztlaku na počte buniek



Obr. 5.10: Závislosť koeficientu odporu na počte buniek

Z uvedených závislostí vyplýva, že pri sieti s menším množstvom buniek ako $1,50E+07$ už nedochádza k výraznej zmene výstupných koeficientov. Tomuto množstvu buniek odpovedá referenčná veľkosť **100 mm**.

Čo sa týka prizmatických vrstiev, hodnoty y^+ sa pohybujú v rozmedzí 30 – 80 pokiaľ nie sú uvažované oblasti s odtrhnutým prúdením. Tam sú hodnoty y^+ nižšie, z dôvodu minimálnej rýchlosti na povrchu. Tento fakt sa ale výrazne ovplyvniť nedá. Na základe informácií uvedených na konci podkapitoly 5.1 je toto rozloženie y^+ (obr. 5.11) pri použití stenových funkcií vyhovujúce.



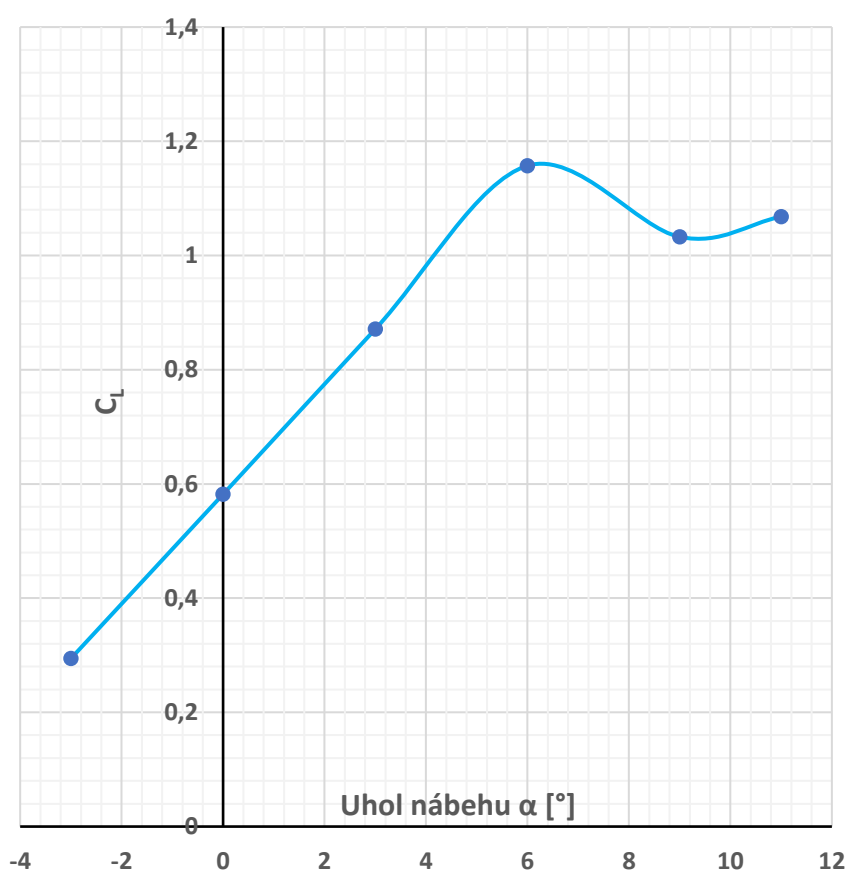
Obr. 5.11: Distribúcia hodnôt y^+ na povrchu Aircaru ($\alpha = 0^\circ$)

5.3 Aerodynamické charakteristiky & porovnanie s letovým meraním

Výstupom sú vztlaková čiara, polára a momentová čiara letového módu Aircaru 5.0. Aerodynamické koeficienty sa vzťahujú na plochu krídla $S = 8,99 \text{ m}^2$, súčiniteľ kľopiaceho momentu ďalej na hĺbku profilu c_{sat} (stredná aerodynamická tetiva) a je vyhodnotený k bodu ležiacemu v 25% hĺbky profilu c_{sat} . Smer kladného momentu je definovaný v zmysle „klopí na chrbát“.

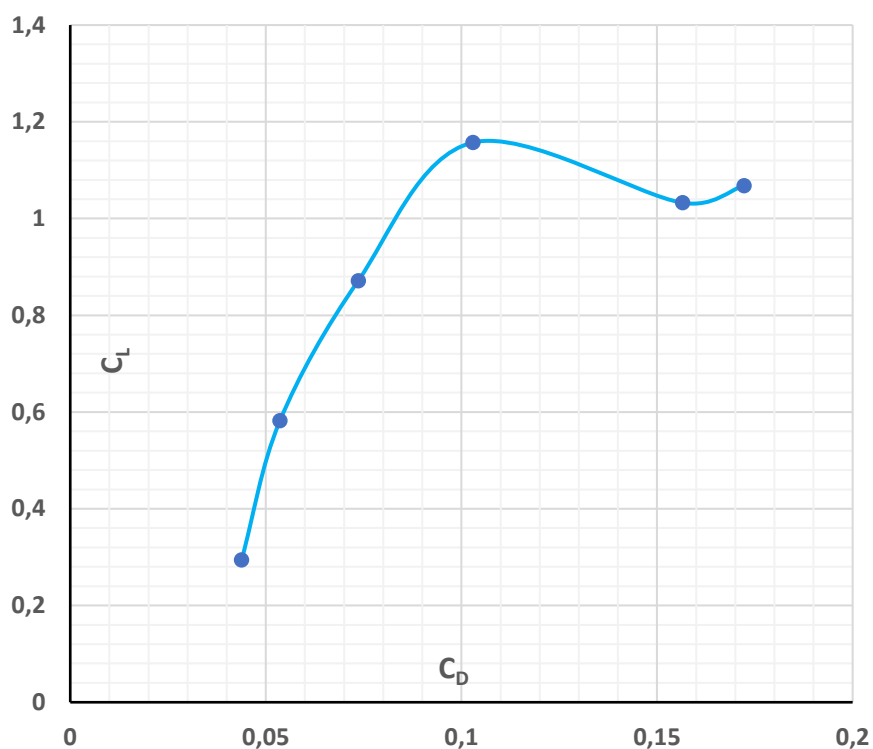
Lineárna časť vztlakovej čiary, respektíve jej sklon je porovnaný s výstupom z letového merania, ktorého dáta sú uvedené v Prílohe B (pre porovnanie sú použité spriemerované hodnoty zo všetkých okruhov). Hodnota kritického uhlu nábehu nie je určená, pretože absolútna hodnota uhlu nábehu v letových meraniach neodpovedá definícií uhlu nábehu letúnu ale elektrickej veličine.

U vztlakovej čiary je badateľný klesavo-stúpajúci charakter po prekročení uhlu nábehu $\alpha = 6^\circ$. Je to zrejme dôsledok priestorových javov v prúdovom poli, napríklad oblasti rozvíreného vzduchu v mieste prechodu krídla do trupu (obr. 5.15).

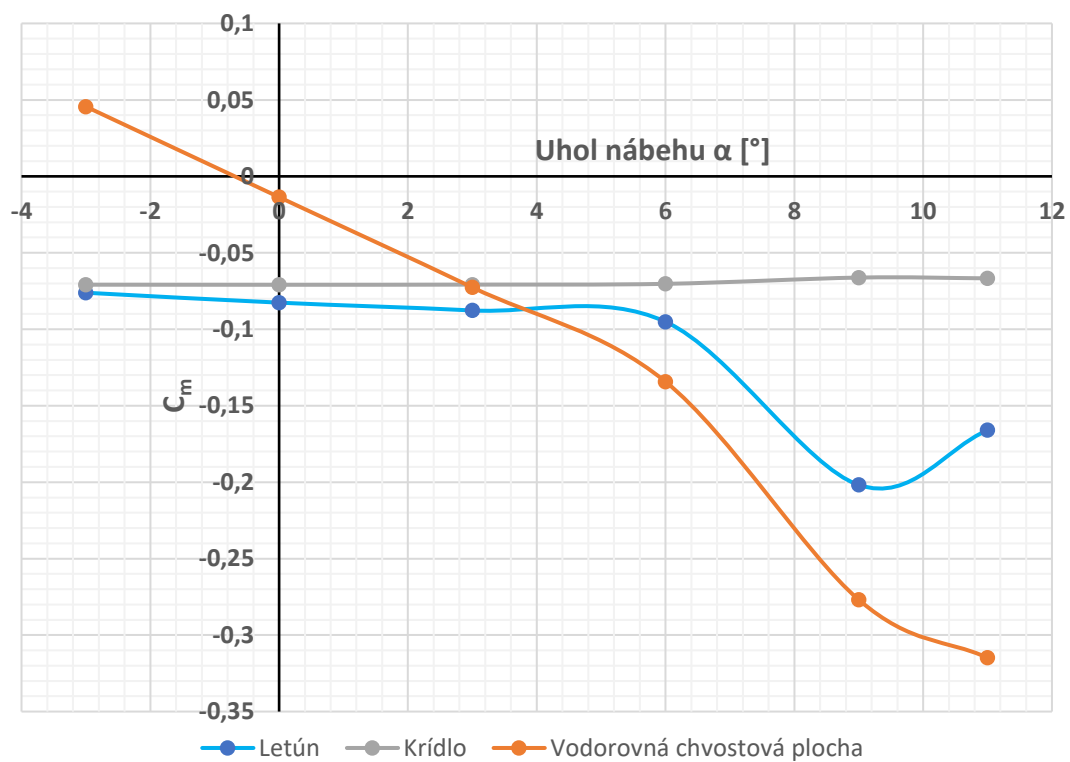


Obr. 5.12: Vztlaková čiara letového módu Aircaru 5.0

Polára (obr. 5.13) a momentové čiary (obr. 5.14) majú z vyššie uvedených dôvodov podobne nepravidelný charakter.

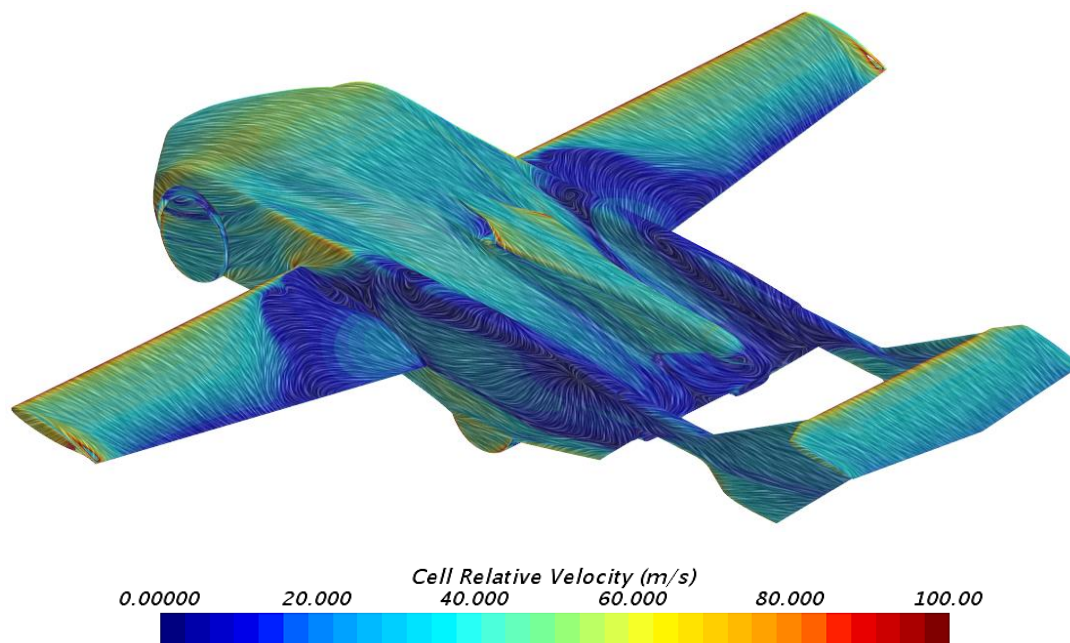


Obr. 5.13: Polára letového módu Aircaru 5.0



Obr. 5.14: Momentové čiary letového módu Aircaru 5.0

Obrázok 5.15 zobrazuje príklad vizualizácie prúdenia, konkrétne rýchlosti a smeru na povrchu Aircaru pri uhle nábehu $\alpha = 9^\circ$. Prítomná je významná separácia prúdenia na krídle v blízkosti trupu. Porovnanie z nižším uhlom nábehu a taktiež ďalšie pohľady sú zobrazené v Prílohe C.



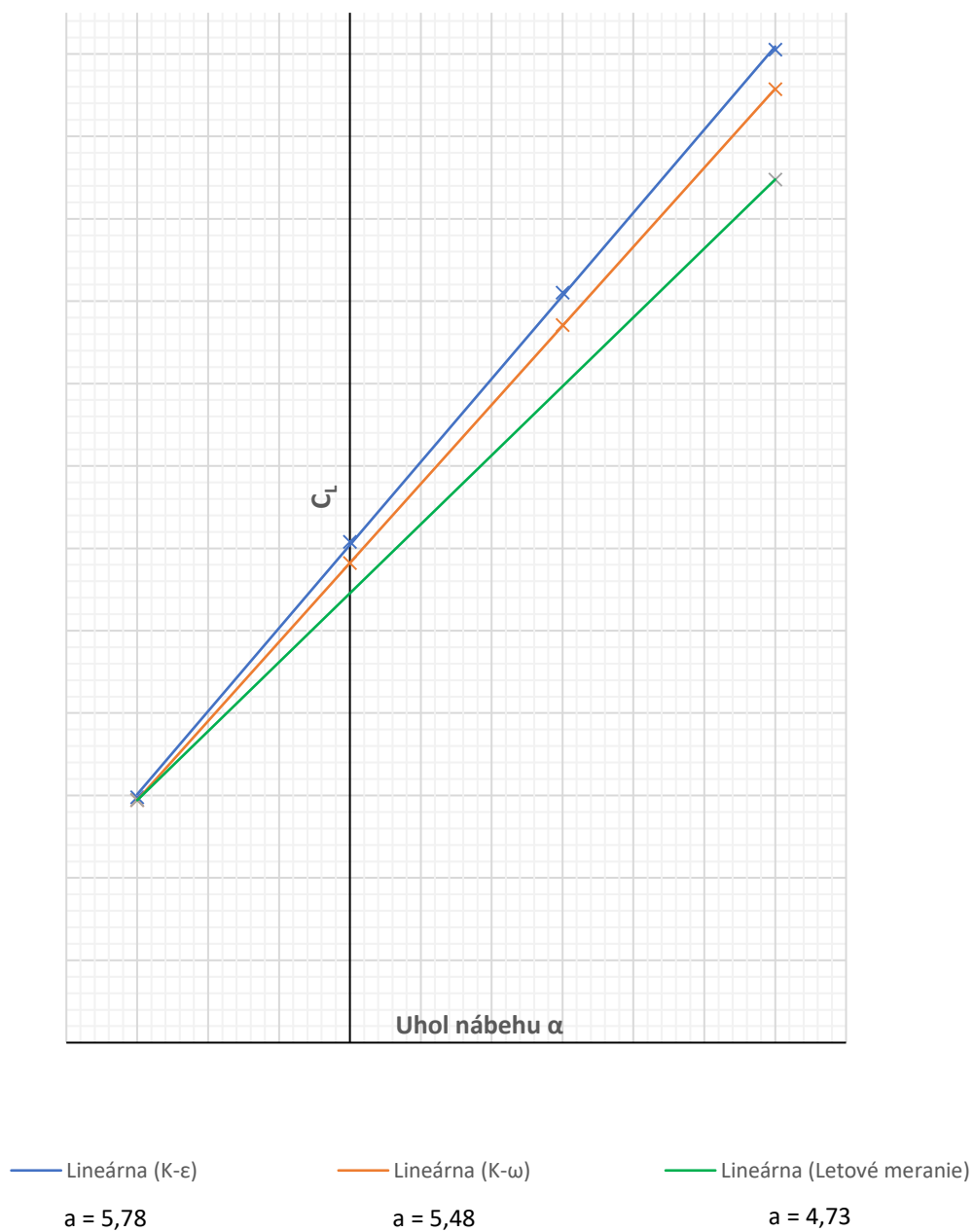
Obr. 5.15: Vizualizácia prúdenia na povrchu Aircaru 5.0 (zadný pohľad)

Porovnanie s letovým meraním charakterizuje obr. 5.16. Graf slúži na zobrazenie rozdielov v sklone vztlakovej čiary a vzťah absolútnych hodnôt uhlu nábehu a koeficientu vztlaku nemusí pre letové meranie platiť (vysvetlenie v prvom odstavci kapitoly). Preto nie sú v obrázku označené hodnoty na jednotlivých osiach.

Model určený na letové merania je s voľným riadením. Pre porovnanie je po správnosti jeho sklon vztlakovej čiary podelený faktorom uvoľnenia výškového kormidla, typicky sa pohybuje okolo $f = 0,98$. Sklon sa tak mierne zvýši.

Výstup nahráva správnosti voľby turbulentného modelu K- ω – sklon sa viac blíži letovému meraniu. Tiež odchýlky výpočtu a letového merania sú akceptovateľné. Definovaný matematický model je z toho dôvodu a tiež vzhľadom na veľmi dobrú zhodu s tunelovým meraním pri 2D simulácii profilu považovaný za dostatočne spoľahlivý na vyvodzovanie relevantných výsledkov.

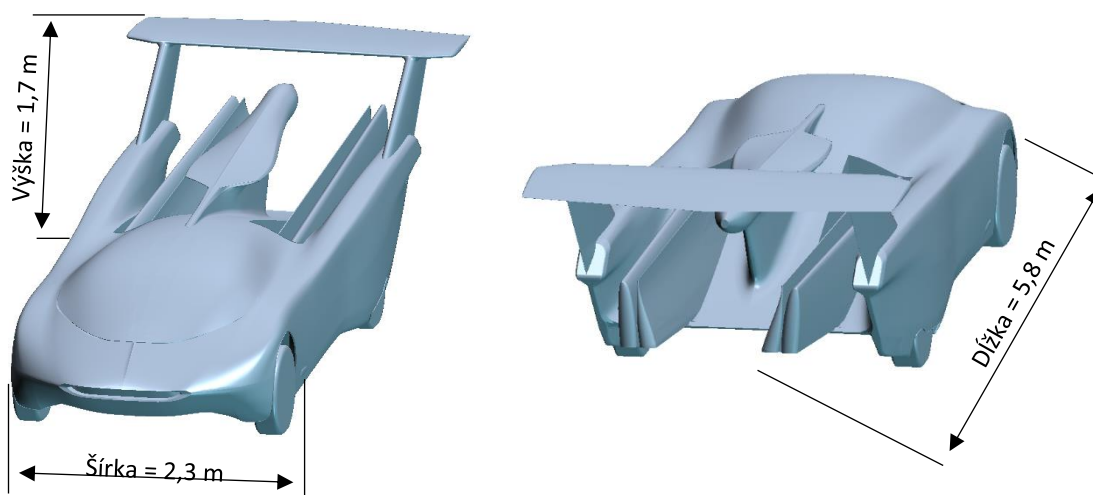
K relevantnosti výsledkov simulácií prispieva výstup z výpočtov modelu s vysokým rozlíšením prizmatických vrstiev, to znamená s $y^+ < 1$ vytvorenou v prostredí iného softwaru (ANSYS Fluent). Výstup je pri zanedbaní minimálnych odchýliek totožný. Bol vytvorený zamestnancami leteckého ústavu VUT v Brne a krátky report z neho je uvedený v Prílohe D.



Obr. 5.16: Porovnanie sklonu vztlakových čiar

6 AERODYNAMICKÁ ANALÝZA MÓDU AUTOMOBIL

Táto kapitola popisuje matematický model pre CFD simuláciu prototypu Aircar 5.0 v móde automobil, t.j. v stave v akom by mal jazdiť na vozovke – zložené krídla, zasunutá chvostová časť (obr. 6.1). Komplexnosť matematického modelu je v porovnaní s letovým režimom vyššia. Je to spôsobené zložitejšou geometriou a v neposlednom rade blízkosťou zeme a rotujúcimi kolesami, ktorých efekt bude taktiež súčasťou simulácií. Preto bude nutné venovať zvýšenú pozornosť štruktúre objemovej siete, prizmatických buniek atď...

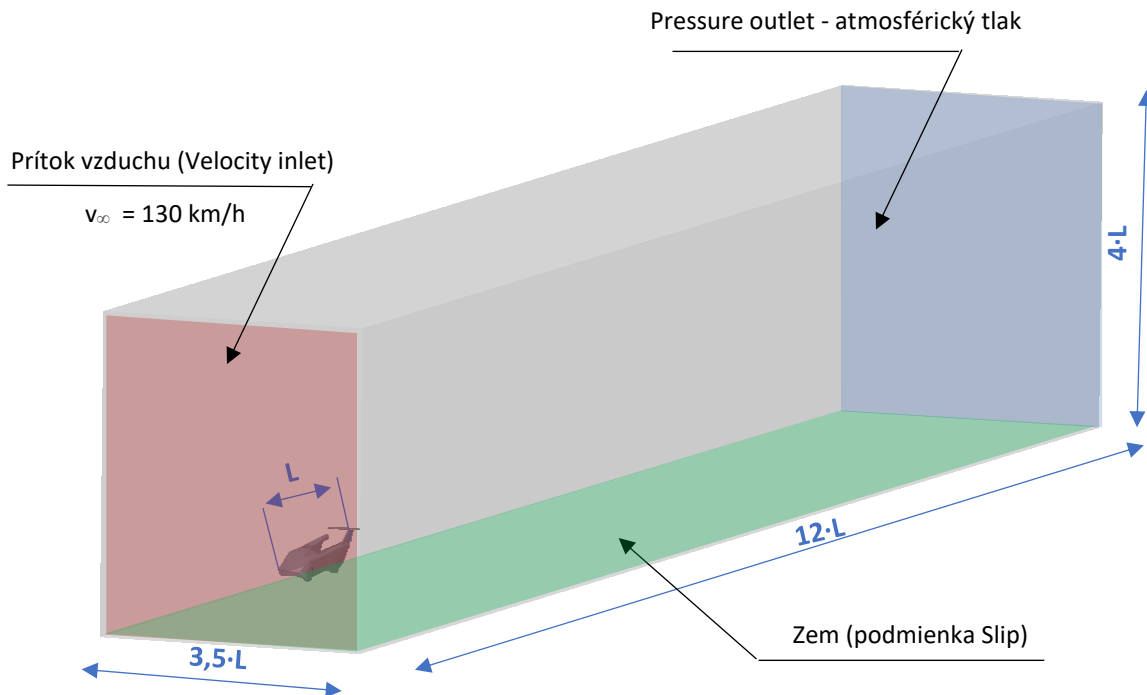


Obr. 6.1: CFD geometria Aircaru 5.0 v móde automobil

Po dosiahnutí spoľahlivej konverencie budú sledované aerodynamické charakteristiky, najmä vztlak/prítlak na jednotlivých nápravách. Pri pohľade na tvary Aircaru môže práve nerovnosť týchto síl vyvolávať problémy so stabilitou jazdy na vozovke. Budú preto analyzované a odsimulované možnosti ako túto stabilitu zlepšiť.

6.1 Nastavenie matematického modelu

Základné rozdelenie siete a referenčná veľkosť bunky vyplývajú z kalibrácie (kapitoly 5.1 & 5.2), ďalšie zjemnenia sú pridané na základe prvotných výsledkov simulácie. Ostáva tiež overený turbulentný RANS model K-Omega, medzná vrstva je modelovaná použitím stenovej funkcie s $y^+ > 30$. Podobne ako pri kalibrácii u letového režimu, i v tomto modeli je využitá symetria (obr. 6.2). Líši sa samozrejme hodnota počiatocnej podmienky vstupnej rýchlosti. Tá bola zvolená na **130 km/h**, čiže reprezentuje maximálnu povolenú rýchlosť na cestách v Českej a Slovenskej Republike. Pri nej sa aerodynamické sily prejavajú najvýraznejšie.



Obr. 6.2: Výpočtová doména módu automobil

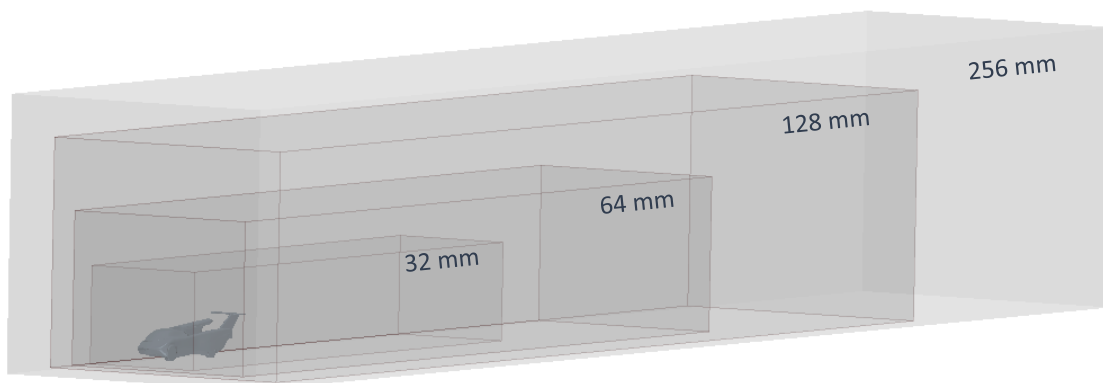
Čo sa týka výpočtovej domény, znovu platí, že najdôležitejším rozmerom je rozmer v smere prúdenia ($8 \cdot L$) z dôvodu úplavu za vozidlom. Všetky neoznačené strany sú definované ako symmetry planes (roviny symetrie) – neovplyvňujú prúdové pole.

Typická úroveň turbulencie pri simulácii vozidla je daná hodnotami:

Pomer turbulentnej viskozity (Turbulent viscosity ratio) = 200

Intenzita turbulencie (Turbulence intensity) = 0,01

Ako bolo spomenuté, pozornosť musí byť venovaná štruktúre objemovej siete. Najprv je ale vhodné pripomenúť základné rozčlenenie objemovej siete obdobné tomu v kapitole 5.1 (obr. 6.3).

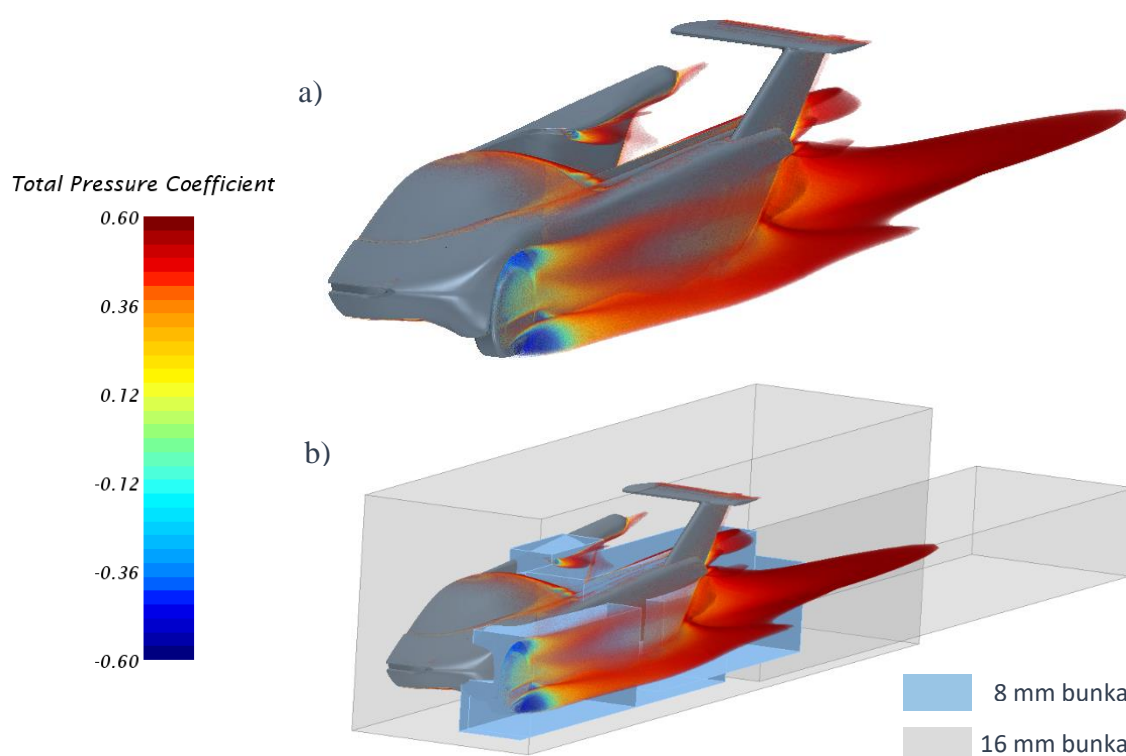


Obr. 6.3: Základné rozčlenenie objemovej siete módu automobil

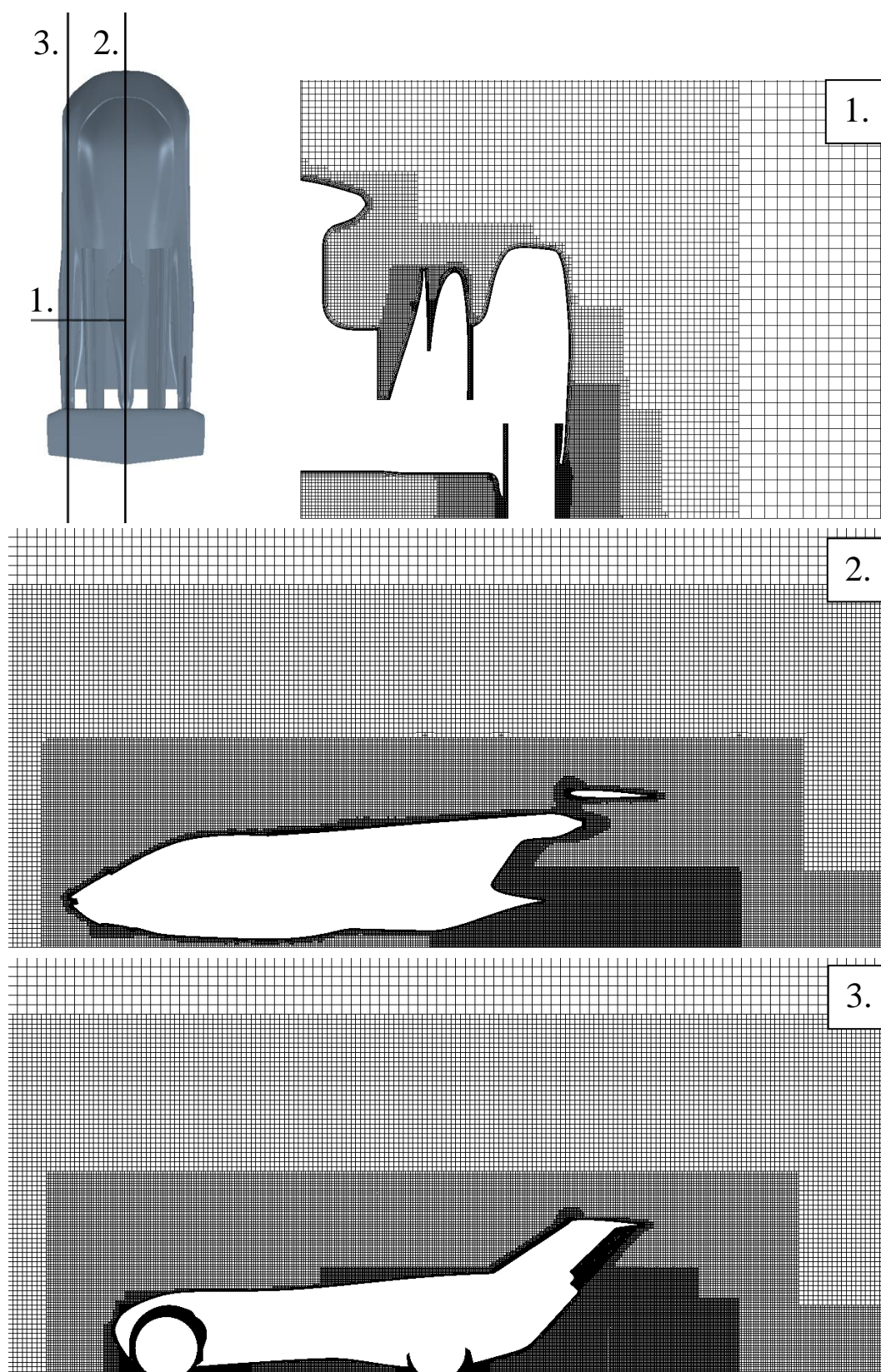
Vozidlo, na rozdiel od lietadla, vo svojom okolí vytvára mohutnejší úplav spôsobený nepriaznivým tlakovým gradientom, v ktorom je prúdenie rozvírené. Na základe prvotných výsledkov (od ktorých ešte nie sú očakávané plnohodnotné výstupné hodnoty) sú na konkrétnych miestach vytvorené geometrické elementy ešte viac zjemňujúce objemovú sieť. Viditeľný úplav sa tvorí v spodnej časti za vozidlom a taktiež po boku spôsobený interakciou prúdenia s prednými kolesami (obr. 6.4a). V týchto miestach sú umiestnené „boxy“ zjemňujúce lokálnu objemovú sieť na 8 mm. Pre plynulý prechod veľkostí buniek je celé blízke okolie Aircaru „orámované“ zjemnením na hodnotu 16 mm. Vizualizácia je na obr. 6.4b.

Pri štrukturalizácii výpočtovej siete nie je možné zabudnúť na oblasť okolo kolies. Tu je potreba najmenších buniek z dôvodu malej medzery kola a podbehu a v neposlednom rade kvôli rotácii kola. Tieto oblasti sú teda ošetrené zjemnením na hodnotu 4 mm, v mieste kontaktu kola s vozovkou dokonca 2 mm.

V modeli sú ďalšie mesta s upravenou štruktúrou siete. Veľkú pozornosť vyžadujú tiež oblasti v okolí zloženého krídla alebo nábežná hrana vodorovnej chvostovej plochy. Náhľad na výslednú štruktúru siete je na obr. 6.5, detailnejšie (vo viacerých rezoch) je k nahliadnutiu v Prílohe E.

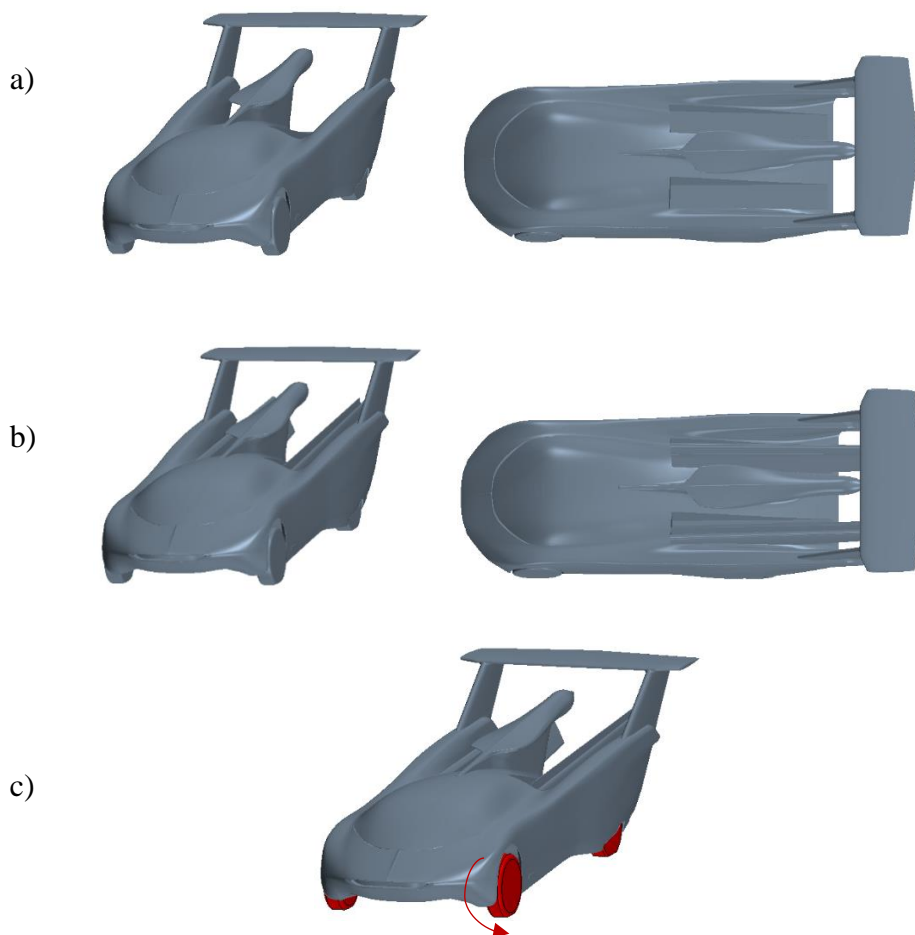


Obr. 6.4: Oblasti zjemnenia siete v okolí úplavu



Obr. 6.5: Náhlady na objemovú sieť

Ešte je podstatné poznamenať, že komplexnosť modelu je budovaná postupne (obr. 6.6). Pri inicializačnom výpočte je geometria bez zloženého krídla v zadnej časti (obr. 6.6a), pretože to obsahuje viacero drobných kontúr a medzier, v ktorých je nutné sieť zjemniť. Následne je do modelu pridané zložené krídlo (obr. 6.6b) a v poslednom kroku sú roztočené kolesá (obr. 6.6c). Postupný rast zložitosti matematického modelu umožní lepšie kontrolovať výpočet, rýchlejšie odhaliť prípadné chyby a tak efektívnejšie dosiahnuť stabilitu výpočtu.



Obr. 6.6: Vývoj komplexnosti modelu

Celkový počet iterácií potrebných k dosiahnutiu konvergovania výpočtu pri postupnom budovaní koplexnosti matematického modelu je 40 000. V procese sú zahrnuté aj úpravy siete, parametrov solveru apod... Rezíduá končia na hodnote $3 \cdot 10^{-4}$ a výstupné sledované hodnoty vztlaku a odporu oscilujú rádovo v desatinách percenta. Model teda spoľahlivo konverguje. Detailnejší priebeh rezíduí je zobrazený v Prílohe F.



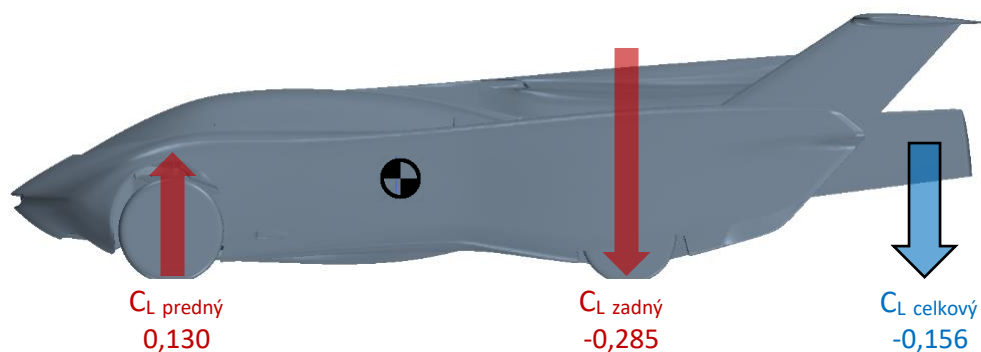
6.2 Referenčné aerodynamické charakteristiky

V tabuľke 6.1 sú uvedené referenčné hodnoty vztlaku a odporu automobilového módu prototypu Aircar 5.0. Vychádzajú z modelu, ktorý je popísaný v kapitole 6.1. Tieto hodnoty budú brané ako predvolené a bude sa s nimi zrovnávať v ďalšej fáze analýzy.

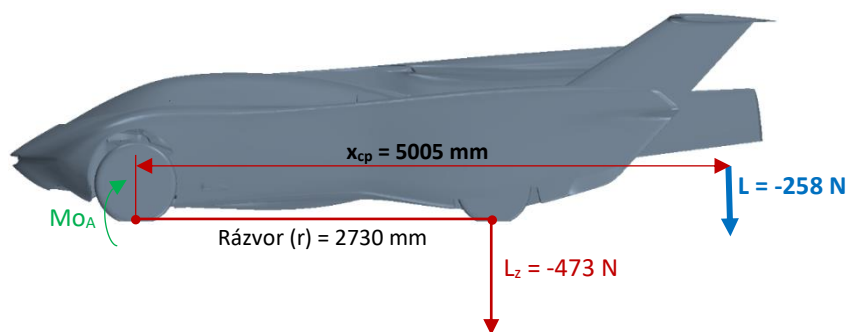
Na obr. 6.7 je schematicky znázornené pôsobenie vztlakových síl.

Tab. 6.1: Referenčné aerodynamické charakteristiky Aircaru 5.0 v móde automobil

Čelná plocha [m ²]	Koeficient vztlaku celkový	Koeficient vztlaku predná náprava	Koeficient vztlaku zadná náprava	Koeficient odporu
2,1606	-0,156	0,130	-0,285	0,233
Poznámka	Vztlak [N] celkový	Vztlak [N] predná náprava	Vztlak [N] zadná náprava	Odpor [N]
130 km/h, $\rho = 1,18415 \text{ kg/m}^3$	-258	215	-473	386



Obr. 6.7: Schematické zobrazenie vztlaku pôsobiaceho na Aircar 5.0



Obr. 6.8: Horizontálna poloha aerodynamického streda

Pomocou reakcií v mieste dotyku kolies a vozovky je možné určiť polohu aerodynamického stredu x_{cp} – miesta na telese, okolo ktorého je aerodynamický moment nulový (obr. 6.8). Pre tento účel je zadaný moment M_{O_A} v bode dotyku predného kolesa s vozovkou, ktorý sa vypočíta pomocou elementárneho vzťahu:

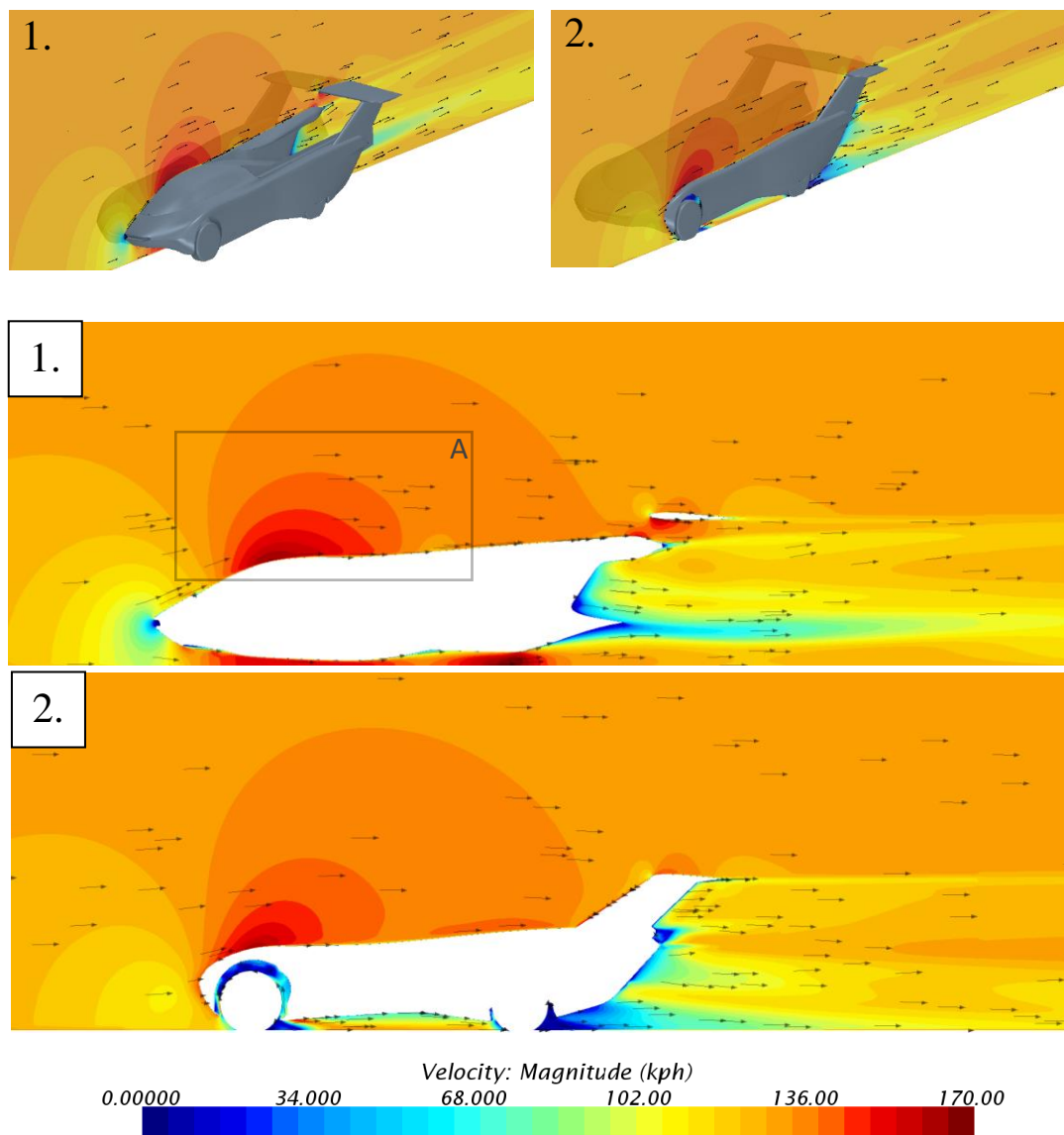
$$M_{O_A} = L_Z \cdot r = -473 \cdot 2,73 = -1291,29 \text{ Nm}$$

Kde, ako je označené na obr. 6.8, L_Z vyjadruje vztlak (resp. prítlak) na zadnej náprave a r je dĺžka rázvoru. Pokiaľ veličina L značí celkový prítlak, aerodynamický stred sa určí vzťahom:

$$L_Z \cdot r = L \cdot x_{cp}$$
$$x_{cp} = \frac{-1291,29}{-258} = 5,01 \text{ m}$$

Z obr. 6.8 vyplýva výrazná nerovnováha vztlaku/prítlaku pôsobiaceho na jednotlivé nápravy. Celkovo síce vozidlo vytvára prítlak – vertikálna sila pôsobí nadol, avšak jeho pôsobisko (aerodynamický stred) sa pri danej modifikácii nachádza až za zadnou nápravou. Vozidlo je relatívne ľahké, jeho hmotnosť je zhruba 700 kg. Keďže sa ťažisko nachádza približne v polovici medzi nápravami, tiažová sila pôsobí rovnomerne na obe nápravy a nemá tak podiel na rozložení vertikálnych síl medzi nimi. Preto nerovnováha aerodynamických síl bude mať veľmi nepriaznivý účinok na stabilitu jazdy – pri vysokých rýchlostiach by sa predná náprava mohla „odlepovať“ od vozovky čo okamžite znamená zhoršenú odozvu riadenia, horšie brzdné vlastnosti atď...

Fyzikálny pôvod nerovnosti aerodynamických síl na nápravách je zrejmý. Výrazne je ovplyvnený faktom, že kabína je tvarovaná ako vztlakové teleso – profil. V letovom režime je toto pozitívne, pri režime automobilu naopak. Na obr. 6.9 (zóna A) možno vidieť pole urýchleného prúdenia v prednej časti kabíny. Je to akýsi ekvivalent zóny s maximálnym zakrivením podtlakovej strany leteckého profilu.

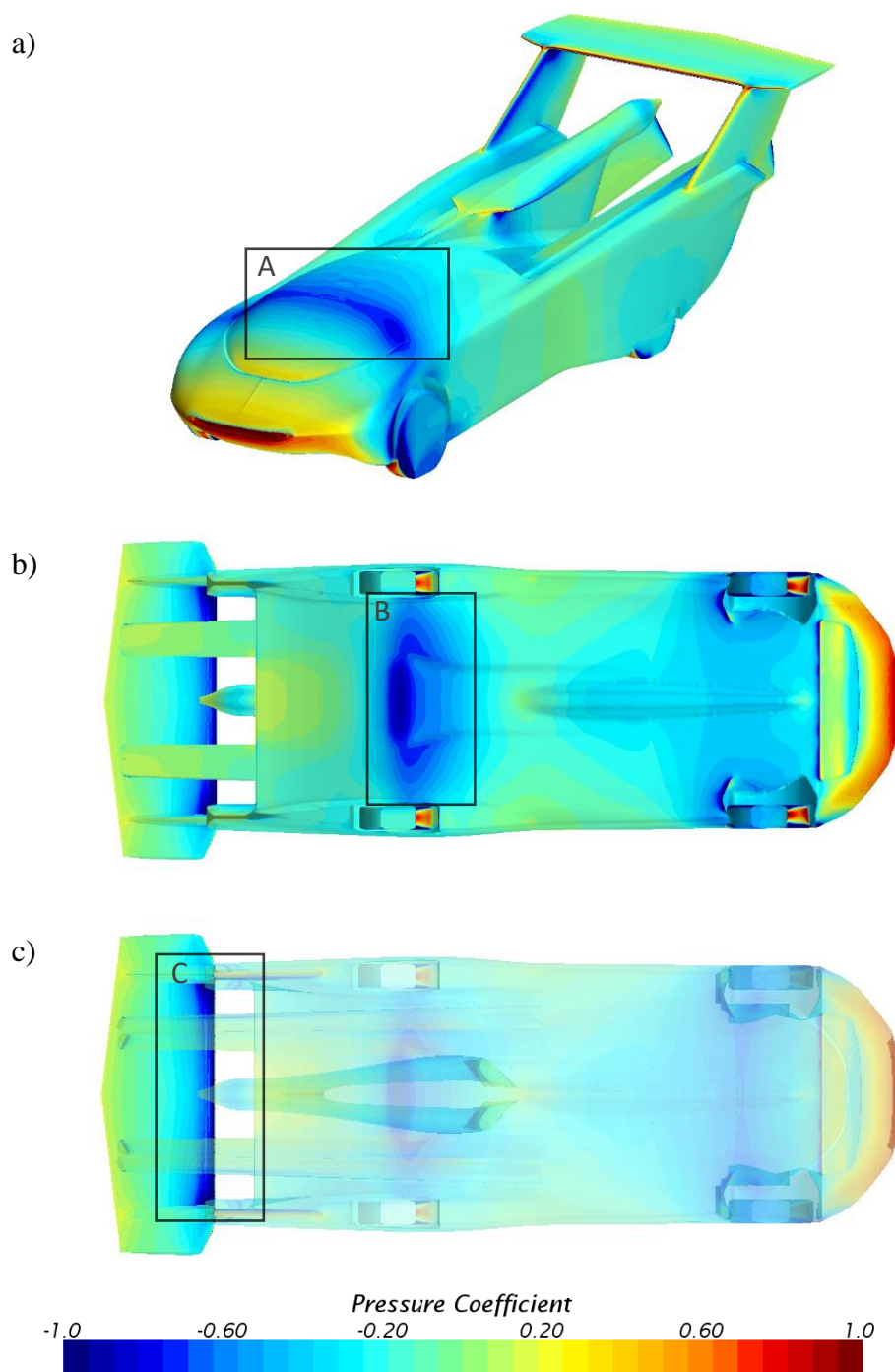


Obr. 6.9: Rýchlostné pole v okolí vozidla v jednotlivých rezoch

Toto potvrdzuje aj vizualizácia tlaku na povrchu vozidla (obr. 6.10a), u ktorej je zrejmá oblasť podtlaku obmývajúca čelné sklo a končiaca pred začiatkom vrtuľového pontónu.

Pri pohľade zospodu vozidla je možné všimnúť si taktiež podtlakovú špičku (obr. 6.10b – zóna B), ktorá vzniká na začiatku difúzora podlahy. Tá nerovnováhu vertikálnych síl na jednotlivých nápravách podporuje. Ďalej rameno vodorovnej chvostovej plochy, ktorá má síce symetrický profil ale zúžený priestor medzi zvislými chvostovými plochami prúdenie urýchľuje a tak generuje silu smerom nadol (obr. 6.10c – zóna C).

Príloha G poskytuje ďalšie vizualizácie prúdenia referenčného stavu vozidla Aircaru 5.0.



Obr. 6.10: Vizualizácia tlaku na povrchu vozidla

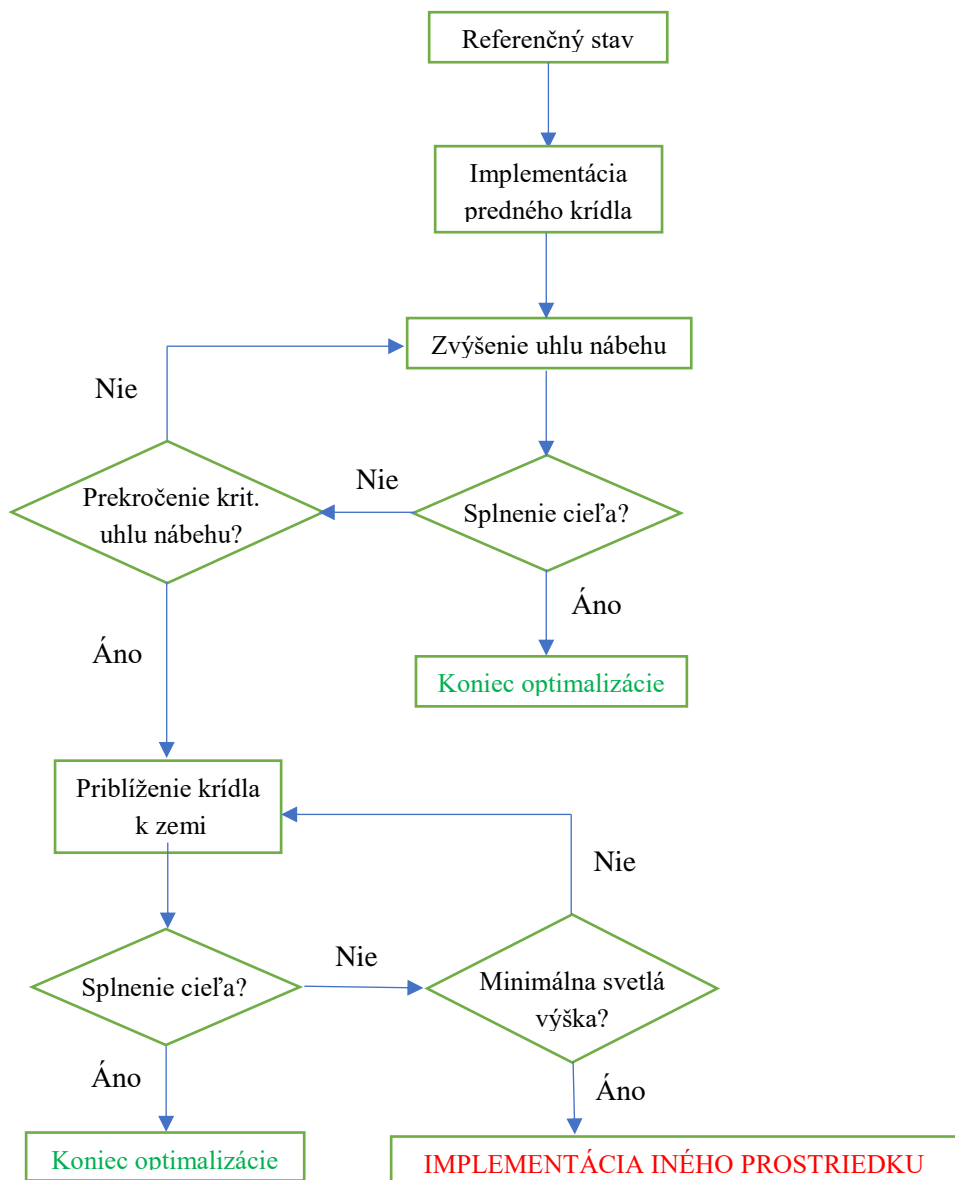
Ďalšie podkapitoly sa budú venovať návrhu a simulácií prostriedkov na zabezpečenie pozdĺžnej aerodynamickej stability vozidla – rovnováhy vertikálnych aerodynamických síl pôsobiacich na jednotlivé nápravy.



6.3 Aerodynamická optimalizácia

Rovnováhy vertikálnych aerodynamických síl pôsobiacich na jednotlivé nápravy má byť dosiahnuté implementáciou predného prítlačného krídla (obr. 6.11), s ktorým počíta koncepčný návrh Aircaru 5.0. Ak by toto riešenie nebolo vyhovujúce resp. neefektívne, budú hľadané iné prostriedky na zabezpečenie pozdĺžnej aerodynamickej stability, pričom dôraz je kladený nie len na aerodynamiku ale aj jednoduchosť implementácie a konštrukcie. Taktiež nie je možné zanedbať vplyv prípadne pridaných prvkov na letový režim. Preto musia byť vysúvacie alebo podložené overením výpočtom v letovom režime.

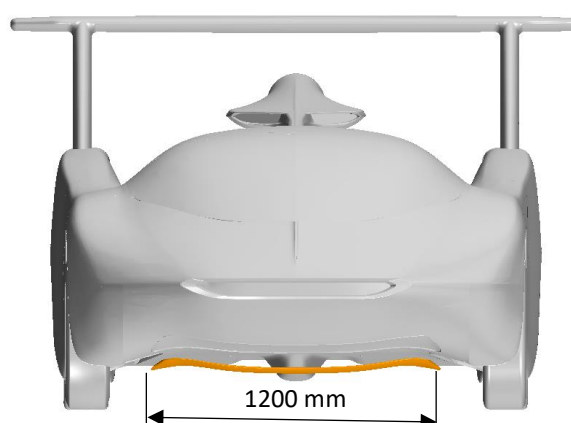
Cieľom optimalizácie je **rovnomerné rozloženie prítlačnej sily medzi nápravami** – minimálne 50:50. Keďže Aircar 5.0 disponuje poháňanými prednými kolesami, nebude prekážať ani vyšší prítlak na prednej náprave.



Obr. 6.11: Optimalizačná schéma implementácie predného krídla

6.3.1 Implementácia predného prítlačného krídla

Predné prítlačné krídlo je umiestnené v nosovej časti pod vozidlom (obr. 6.13). Geometria je obmedzená niekoľkými požiadavkami. 3D tvar musí kopírovať spodok podlahy, tzn. miesta, do ktorého bude krídlo možné zasúvať. Profil musí byť relatívne tenký, s malým zakrivením – taktiež z dôvodu „uskladnenia“ v trupe. Uchytenie predného krídla nie je súčasťou CFD modelu pretože jeho podoba ešte nie je finálne známa. Avšak predpokladá sa uchytenie z vrchnej strany krídla čo znamená minimálne ovplyvnenie jeho efektivity keďže podstatná je čistota prúdenia na sacej (spodnej) strane.

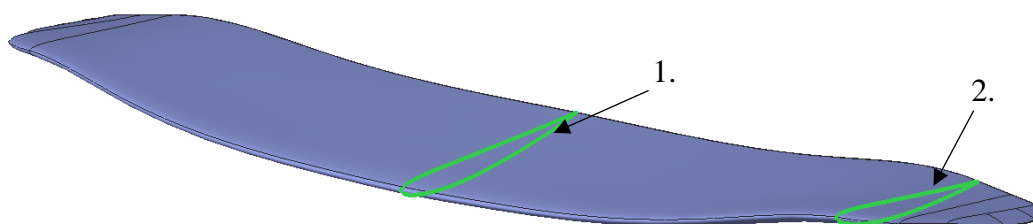


Obr. 6.13: Poloha predného prítlačného krídla

Čo sa týka profiláže, vygenerovaný je NACA profil s označením 2408 a síce s nasledujúcimi hodnotami parametrov:

- *Maximálna krivosť: 2% hĺbky profilu*
- *Poloha maximálnej krivosti: 40% hĺbky profilu*
- *Maximálna hrúbka: 8% hĺbky profilu*

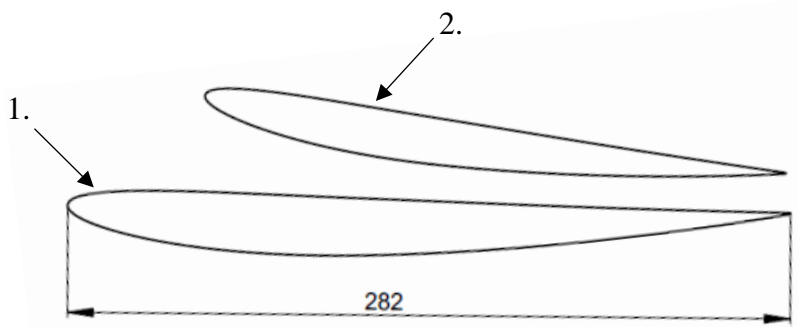
3D tvar vychádza z referenčného modelu poskytnutého dizajnérom Aircaru 5.0. Krídlo je geometricky skrútené, tzn. že hĺbka profilu i uhol nábehu sa menia po rozpätí. CAD je vytvorený ako plošný model pomocou softwaru Creo Parametric 3.0 (obr.6.14).



Obr. 6.14: CAD model predného prítlačného krídla

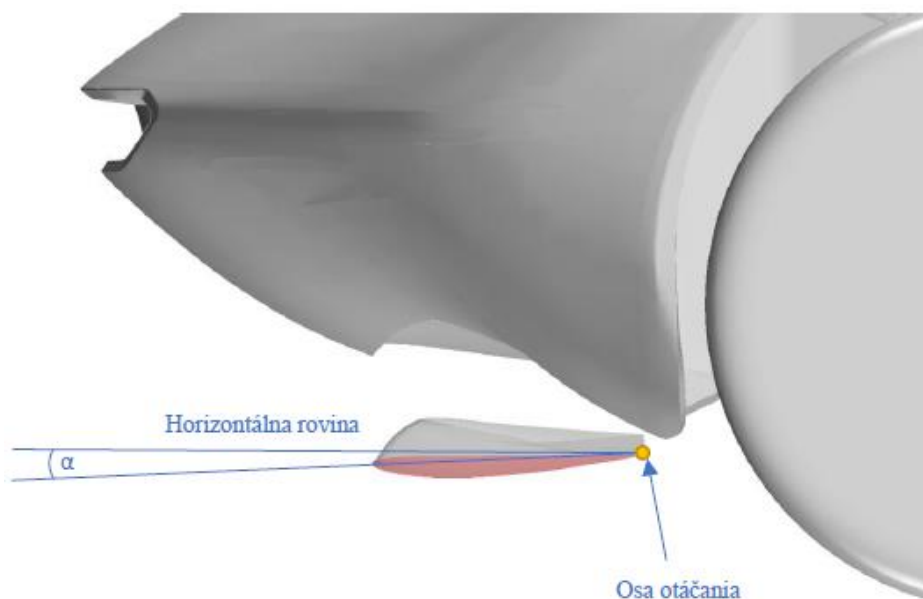


Náhľad na profiláž je na obr. 6.15. Číselné označenia odpovedajú polohe rezu na obr. 6.14.



Obr. 6.15: Profil NACA 2408 predného prítlačného krídla

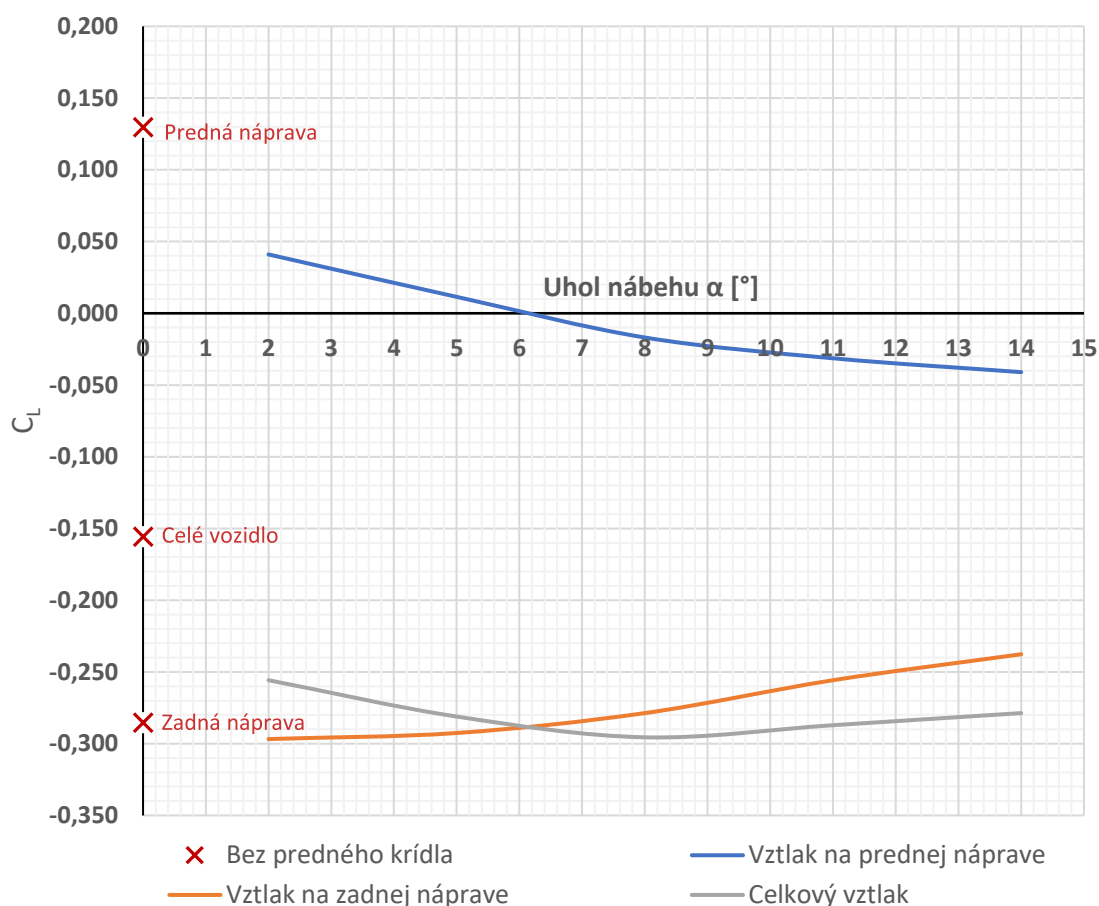
Testovaných je viac uhlov nábehu predného krídla. Uhol nábehu α je definovaný obrázkom 6.16. Osa otáčania prechádza odtokovou hranou profilu v rovine symetrie z dôvodu zachovania dostatočnej medzery medzi podlahou a predným prítlačným krídlom.



Obr. 6.16: Definovanie uhlu nábehu α predného prítlačného krídla

Podľa očakávania implementácia predného krídla spôsobila zmenšenie vztlaku resp. nárast prítlačnej sily na prednej náprave (obr. 6.17). So zvyšujúcim sa uhlom nábehu táto prítlačná sila stúpa. Pokiaľ ide o aerodynamické sily na zadnej náprave, tam logicky dochádza k zníženiu prítlačnej sily – moment od podtlaku pod predným krídlom zadnú

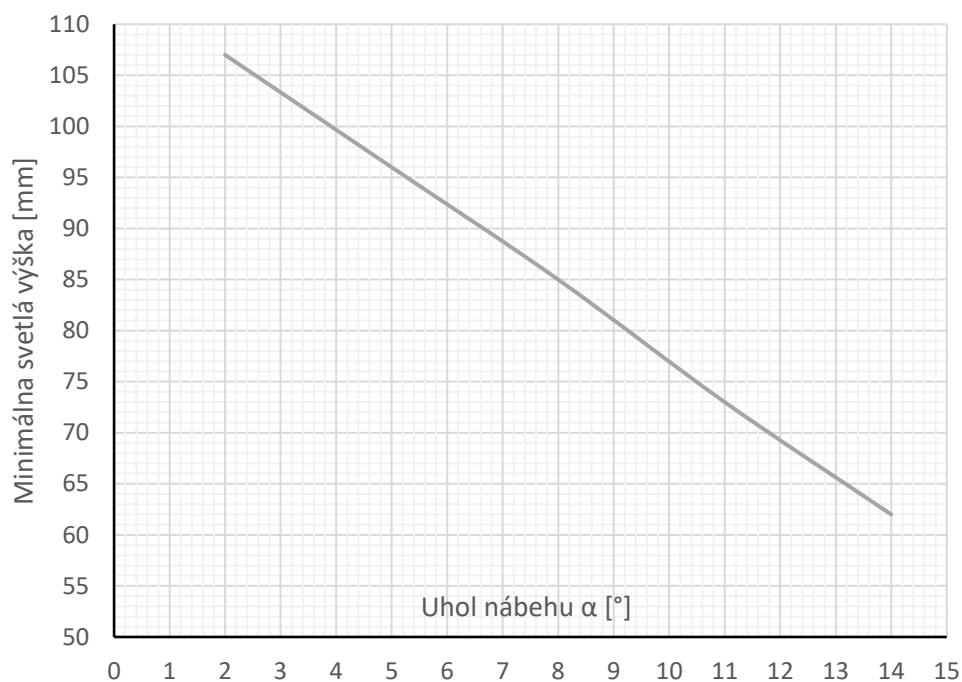
nápravu „odľahčuje“ a taktiež mierne klesá účinok difúzora na konci podlahy kvôli rozrušeniu prúdenia pod vozidlom v dôsledku úplavu od predného krídla.



Obr. 6.17: Závislosť vztlaku na uhle nábehu predného krídla

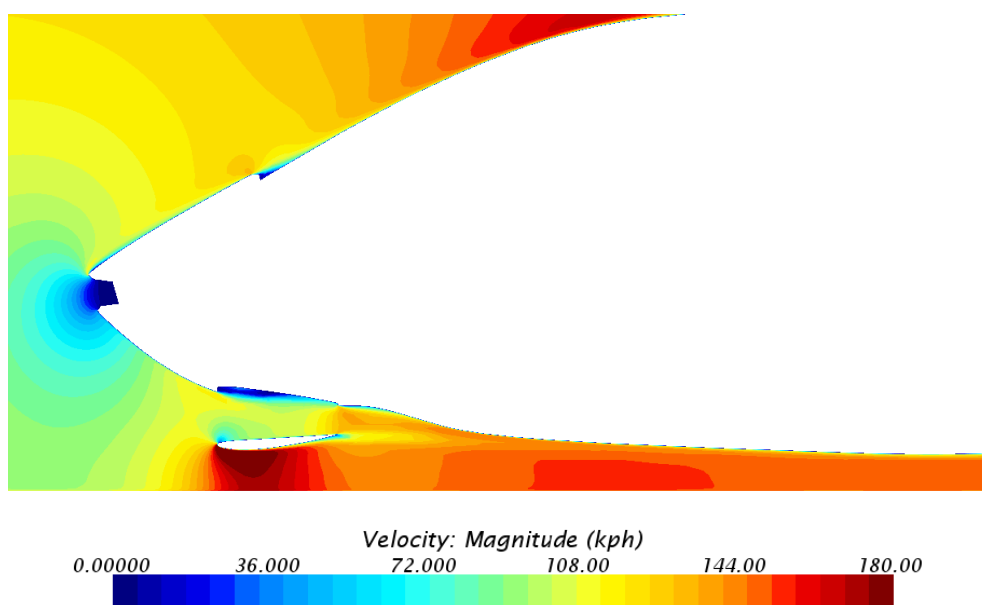
Hodnoty koeficientu vztlaku C_L sa vzťahujú vždy k rovnakej referenčnej čelnej ploche $A = 2,1606 \text{ m}^2$ aby boli výsledky porovnateľné.

Pri uhle nábehu $\alpha = 14^\circ$ už dochádza ku znateľnej separácii prúdenia na podtlakovej strane (obr. 6.20), a preto nie je ďalej zvyšovaný. Z obr. 6.17 vyplýva, že samotnou implementáciou predného krídla nemožno dosiahnuť vhodné rozloženie prítlaku medzi nápravami – výraznejšie väčší je stále prítomný na zadnej náprave. Priblíženie krídla vozovke a zvýšenie jeho účinku vplyvom prízemného efektu je taktiež obmedzené. Minimálna svetlá výška sa u športových automobilov pohybuje okolo 120 mm, u Aircaru vychádza táto hodnota nižšie (obr. 6.18). Príliš malá svetlá výška by mohla spôsobovať praktické komplikácie pri jazde na cestných komunikáciách (škrtanie o vozovku apod.).

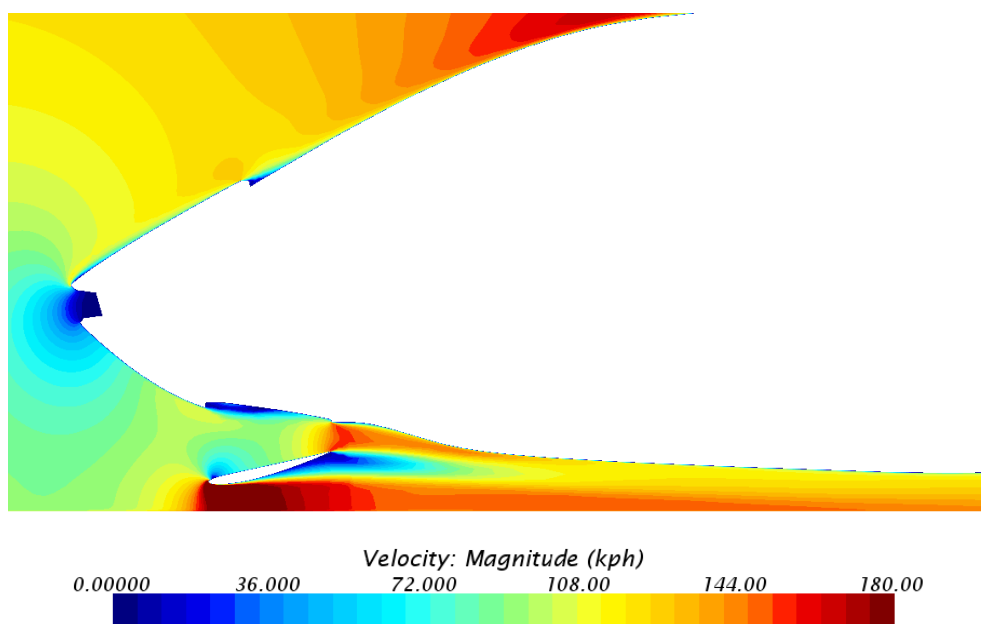


Obr. 6.18: Minimálna svetlá výška v závislosti na uhle nábehu predného krídla

Na obr. 6.19 a 6.20 možno vidieť vizualizáciu prúdenia v rovine symetrie v okolí predného krídla pre uhly nábehu $\alpha = 5^\circ$ a $\alpha = 14^\circ$, kde už dochádza k výraznej separácii.



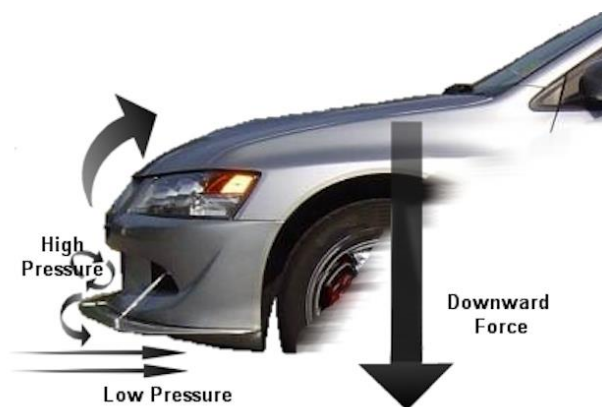
Obr. 6.19: Rýchlostné pole v okolí predného krídla pri uhle nábehu $\alpha = 5^\circ$



Obr. 6.20: Rýchlostné pole v okolí predného krídla pri uhle nábehu $\alpha = 14^\circ$

Zvýšení tlaku na prednej náprave by mohlo pomôcť posunutie predného krídla dopredu čiže bližšie k nosu vozidla, avšak nie v dostatočnej miere. Preto a tiež s prihliadnutím na náročnosť zakomponovania vysúvacieho predného krídla do konštrukcie vozidla budú v ďalších kapitolách hľadané jednoduchšie metódy na posunutie aerodynamického streda k prednej náprave.

Jedným z takýchto riešení by mohlo byť nahradenie predného krídla jednoduchým splitterom (vysunutá hrana pod nosovou oblasťou) (obr 6.21).

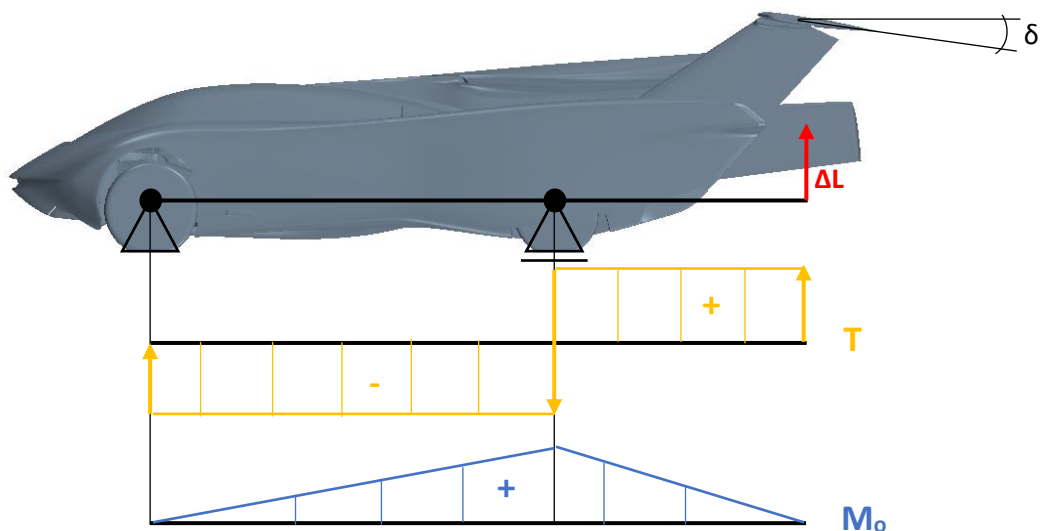


Obr. 6.21: Princíp generovania tlaku na prednej náprave pomocou splitteru [28]

Splitter má za úlohu „rozdeliť“ prúdové pole tak aby sa nad ním generovala oblasť vysokého tlaku, ktorá bude smerovať nad vozidlo a tým pádom umožní vznik podtlaku pod splitterom a v prednej časti podlahy. Jeho implementácia bude skúmaná v ďalšom priebehu.

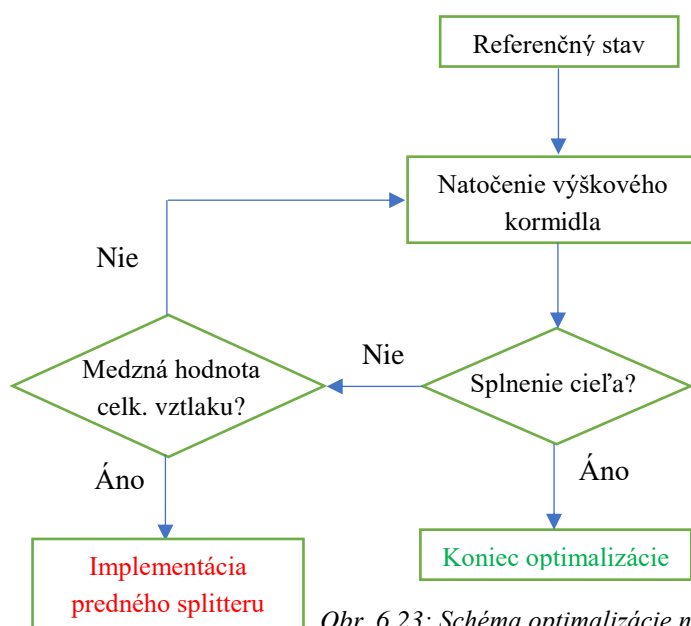
6.3.2 Vychýlenie výškového kormidla

Efektívnym spôsobom redukovania vztlaku na prednej náprave môže byť vychýlenie výškového kormidla nadol, tak aby generovalo vyšší vztlak. Dôjde tak ku zredukovaniu celkovej prítlačnej sily a „odľahčeniu“ zadnej nápravy – aerodynamický stred sa posunie dopredu. Grafická interpretácia tejto úvahy je na obr. 6.22 skrz aplikovanie výsledných vnútorných účinkov. Veličina ΔL predstavuje prírastok vztlaku na chvostovej ploche.



Obr. 6.22: Silové účinky prírastu vztlaku na výškovom kormidle

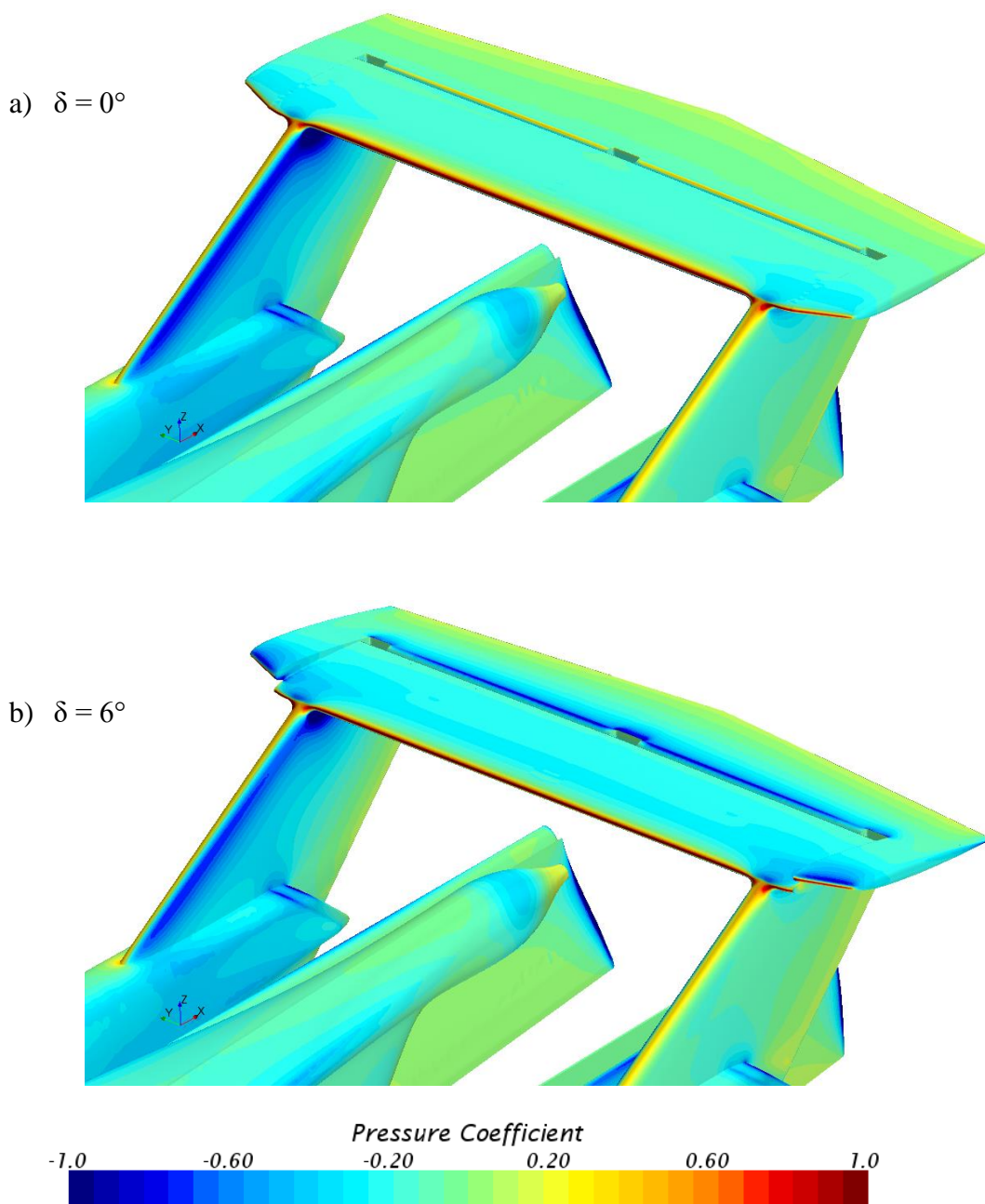
Hľadané je opäť rovnomerné rozloženie vertikálnych aerodynamických síl na jednotlivých nápravách. Avšak pri určitej výchylke výškového kormidla dôjde k zmene orientácií celkového vztlaku na kladný, t.j. nahor. Medzná hodnota celkového koeficientu vztlaku C_L je nastavená na 0,025 kedy možno jej účinok zanedbať.



Obr. 6.23: Schéma optimalizácie natočením výškového kormidla

Dôsledok výchylky výškového kormidla na prúdenie na vodorovnej chvostovej ploche je viditeľný na obr. 6.24. Znáznorné je porovnanie nevychýleného výškového kormidla s vychýlením kormidla o 6° .

Vzhľadom na zahrnutie výškového kormidla do geometrie matematického modelu sú očakávané menšie zmeny aj u nevychýleného kormidla oproti referenčnému stavu, v ktorom bola kvôli zjednodušeniu vodorovná chvostová plocha „v celku“.



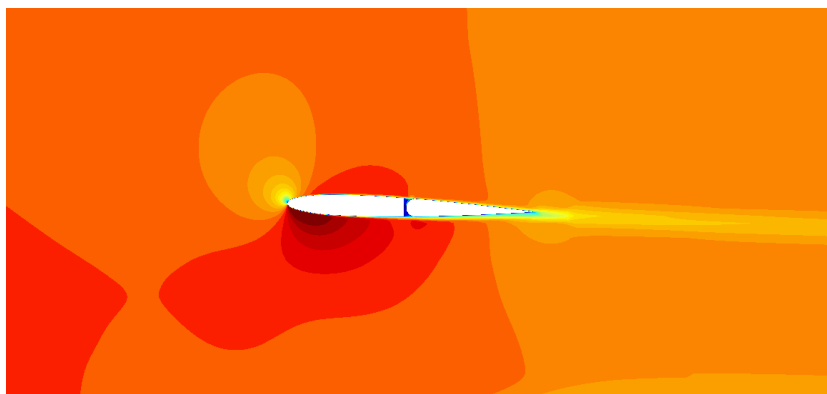
Obr. 6.24: Rozloženie tlaku v dôsledku vychýlenia výškového kormidla



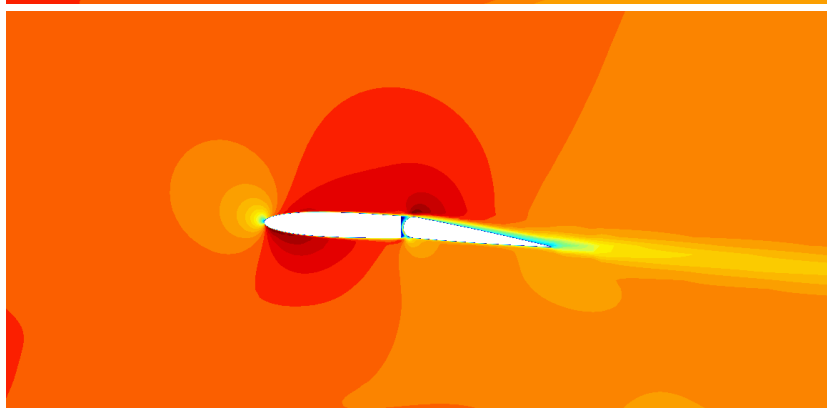
Názorná je tiež vizualizácia rýchlostného poľa v rovine 250 mm od roviny symetrie (obr. 6.25), kde je badateľná oblasť urýchlenia prúdenia nad vodorovnou chvostovou plochou.

Celá táto oblasť je ošetrová zjemnením siete. Najmä malá medzera medzi kormidlom a chvostovou plochou, kde sú prítomné vôbec najmenšie bunky z celého modelu (obr. 6.26).

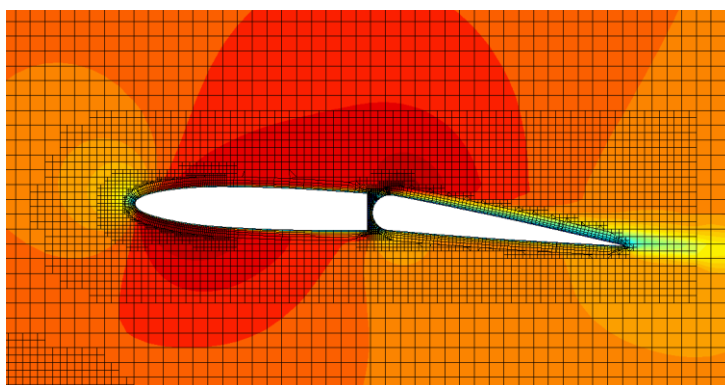
a) $\delta = 0^\circ$



b) $\delta = 6^\circ$

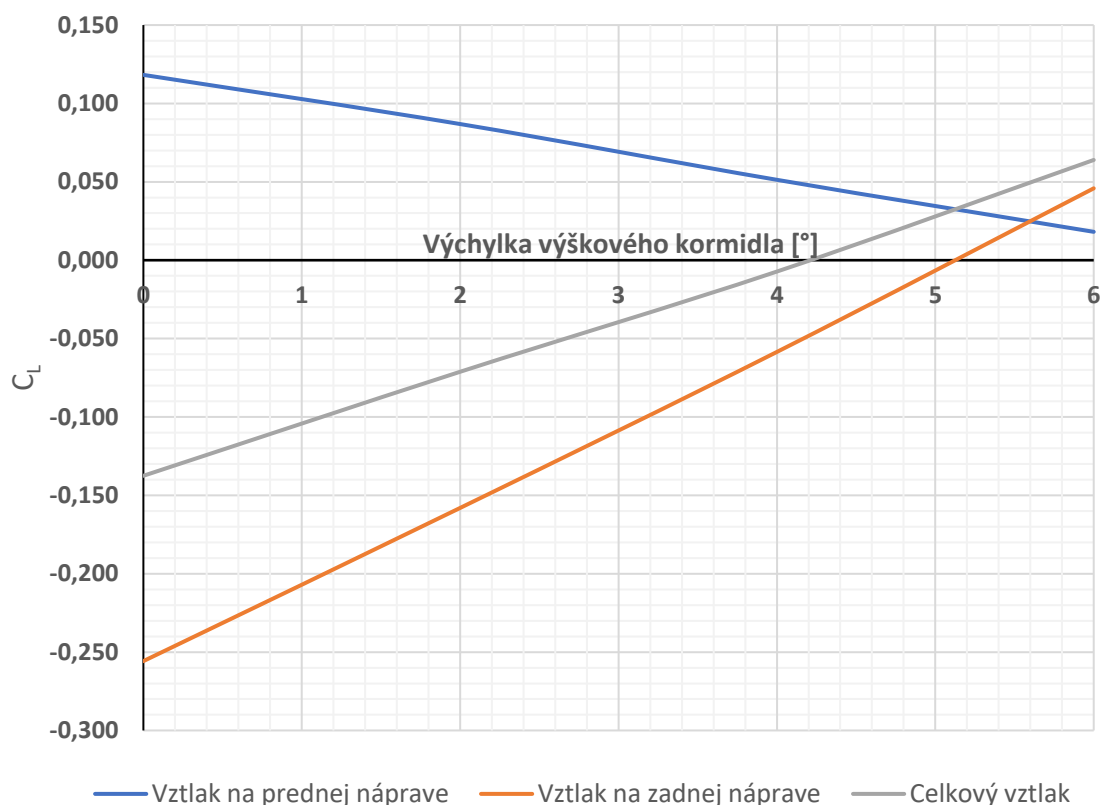


Obr. 6.25: Rýchlostné pole v okolí vodorovnej chvostovej plochy (v rovine 250mm od roviny symetrie)



Obr. 6.26: Zjemnenie siete v okolí vodorovnej chvostovej plochy

Výstupom z tejto časti optimalizácie je závislosť koeficientov vztlaku na uhle vychýlenia výškového kormidla (obr. 6.27).

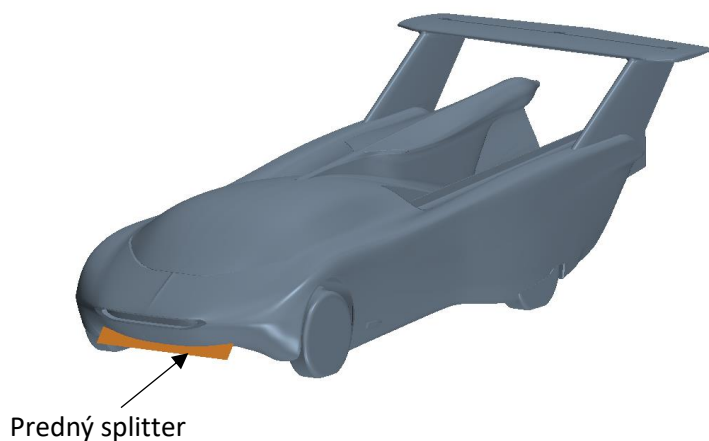


Obr. 6.27: Závislosť koeficientu vztlaku na výchylke výškového kormidla

Priebeh závislostí je takmer lineárny. So zvyšujúcou sa výchylkou dochádza k očakávanému poklesu vztlaku na prednej náprave. Vztlak na zadnej náprave a vztlak celový postihuje opačný trend. Podstatné je, že takéto vychýlenie priaznivo prispieva k rovnováhe vertikálnych aerodynamických síl na jednotlivých nápravách. Veľmi priaznivými sa javia výchylky 4 až 5° kde je vplyv aerodynamických síl vzhľadom na hmotnosť vozidla v podstate neutralizovaný. Aplikovať toto riešenie by malo i ďalšie výhody v podobe konštrukčnej jednoduchosti (jedinou nutnosťou by bola aretácia kormidla v istej polohe) a nulového nárastu hmotnosti.

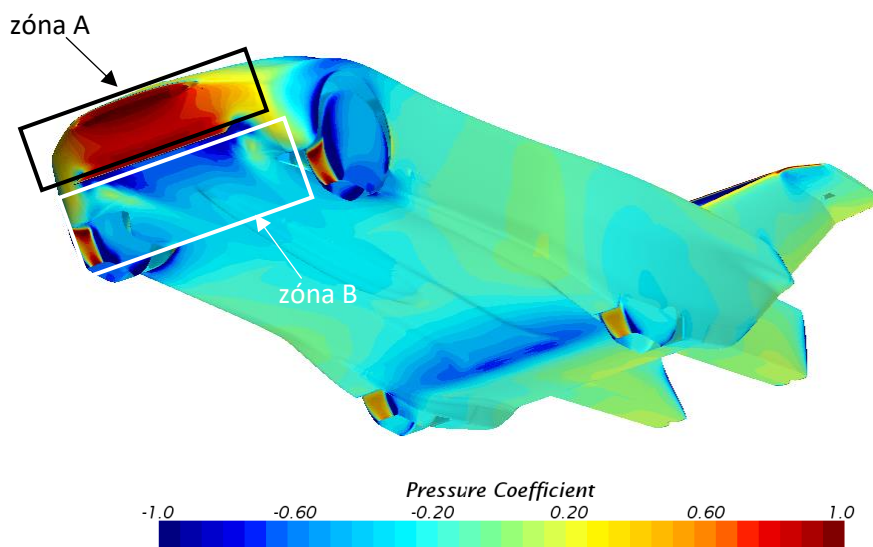
6.3.3 Implementácia predného splitteru s vychýlením výškového kormidla

Vysunutá hrana pod nosovou časťou (splitter) (obr.6.28) má umožniť ďalšie zvýšenie prítláčnej sily na prednej náprave. Tento jednoduchý aerodynamický prvok pred seba nahromadí oblasť vysokého tlaku, ktorá sa premietne ako prírastok sily pôsobiacej nadol (obr. 6.29 – zóna A).



Obr. 6.28: CFD model Aircaru 5.0 s predným splitterom

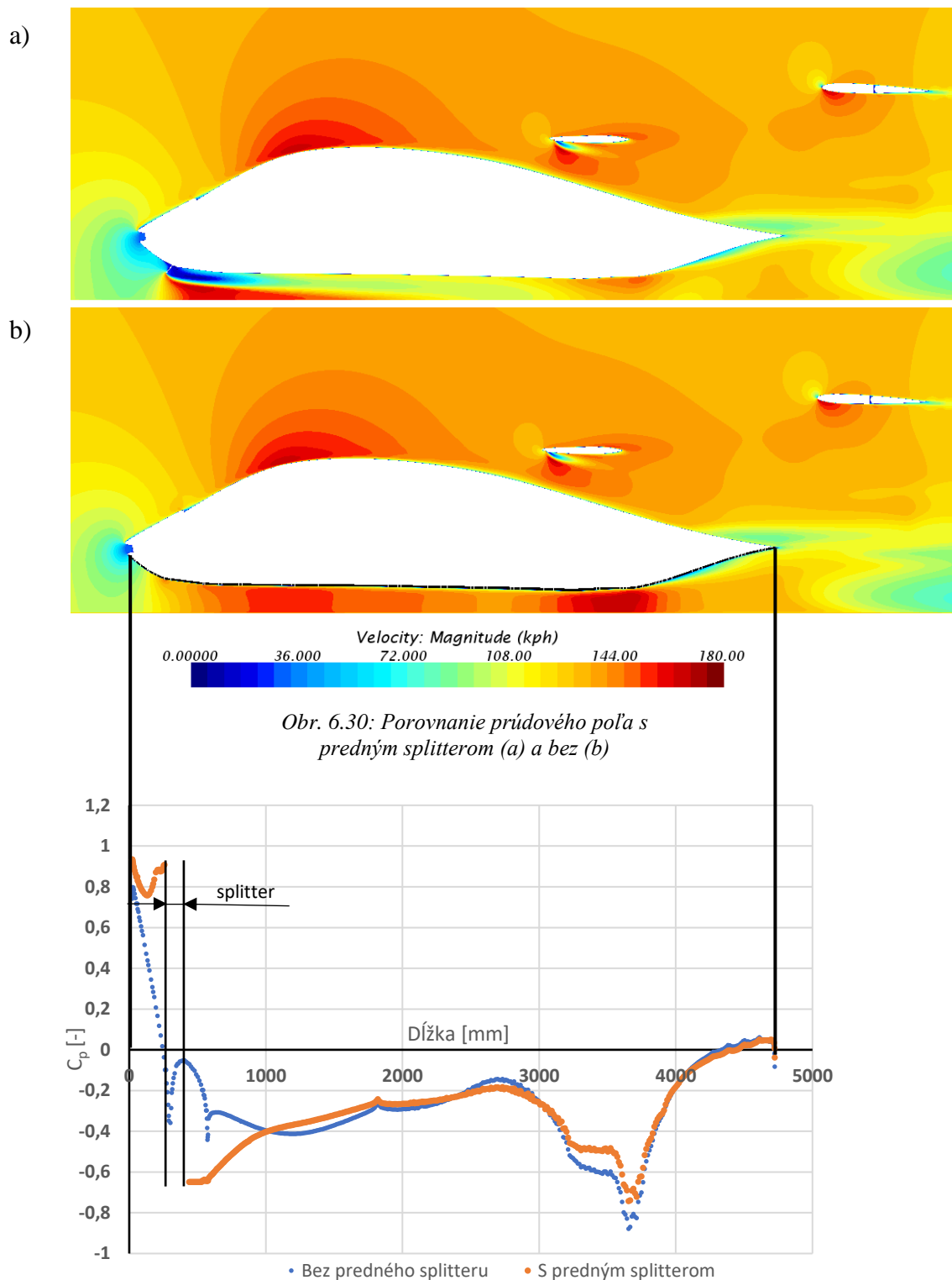
Zúženie medzery medzi podlahou a vozovkou spôsobuje taktiež urýchlenie prúdenia v oblasti pod splitterom, čo znamená výskyt lokálneho podtlaku (zóna B - obr. 6.29).



Obr. 6.29: Rozloženie tlaku na povrchu po implementácii predného splitteru

Na obr. 6.30 možno vidieť porovnanie prúdového pola v rovine 250 mm od roviny symetrie. Batdateľný má byť rozdiel prúdenia pod vozidlom spôsobený implementáciou

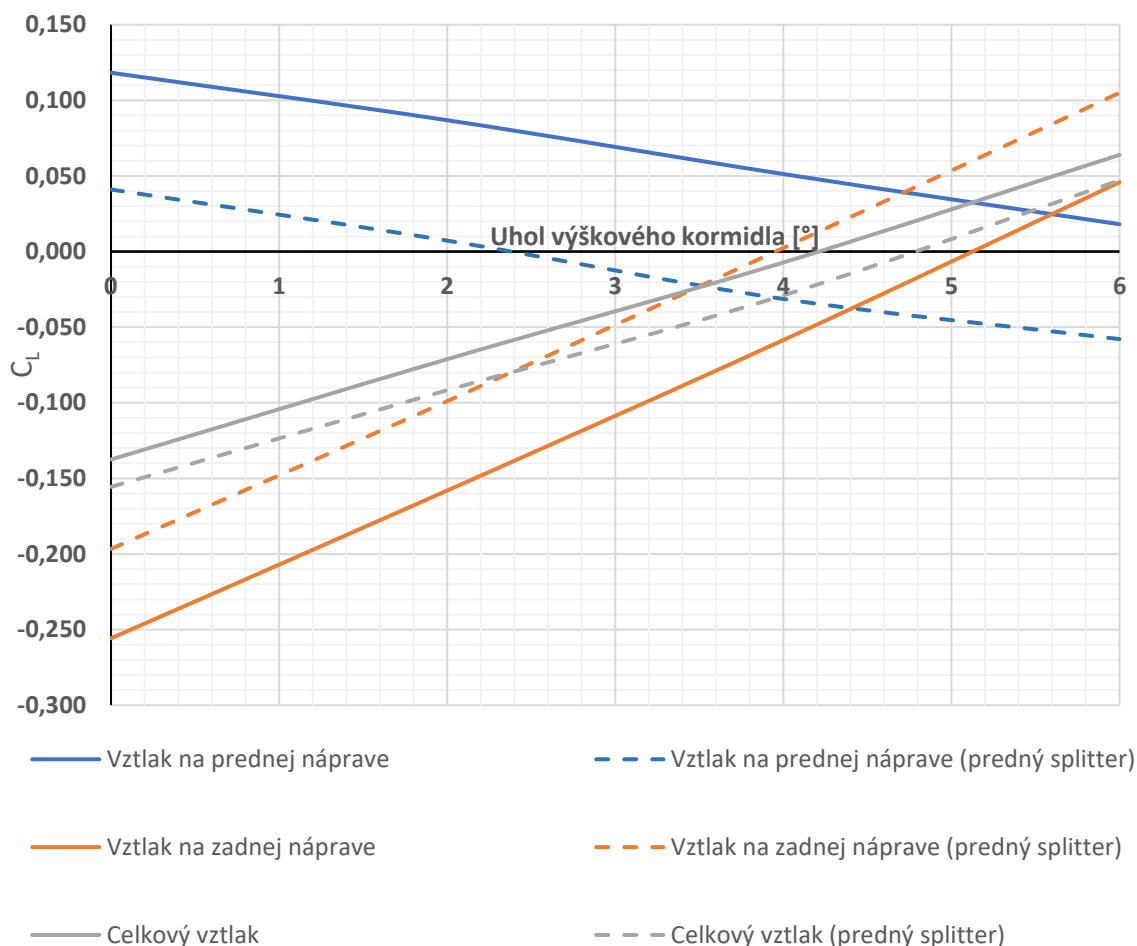
predného splitteru (obr. 6.30a). Tento rozdiel je ešte doložený obr. 6.31, ktorý reprezentuje porovnanie hodnôt koeficientu tlaku C_p na spodnej strane vozidla v danom reze (čierna krivka na obr. 6.30b). Práve kvôli vyššiemu podlaku v prednej časti je výsledkom tejto konfigurácie zvýšenie prítlaku na prednej náprave.



Obr. 6.31: Porovnanie koeficientov tlaku pod vozidlom s predným splitterom a bez



Ďalším výstupom je porovnanie závislostí koeficientu vztlaku na výchylke výškového kormidla s predným splitterom a bez (obr. 6.32). Z grafu vyplýva, že sklon čiar vyjadrujúcich tieto závislosti so splitterom a bez je takmer totožný. Celkovo dochádza k posunu vztlaku na prednej náprave do záporných hodnôt, v prípade zadnej nápravy vztlak mierne narastá. Dá sa ale hovoriť o pozitívnom prínose k pozdĺžnej stabilite. V rozmedzí výchyliek výškového kormidla od 3 do 4° je prítomný mierny prítlak na celom vozidle.

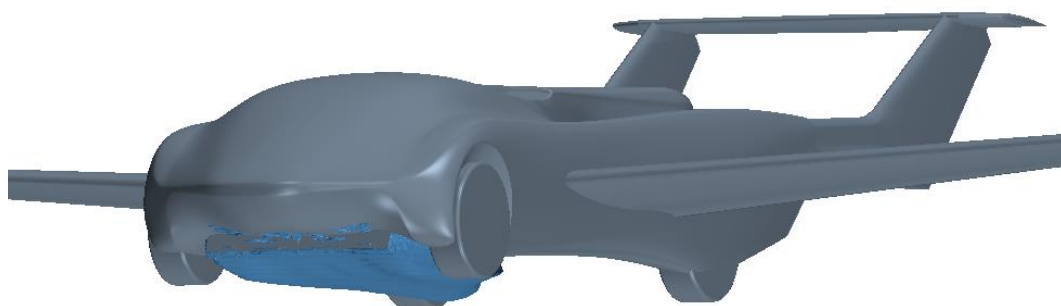


Obr. 6.32: Závislosť koeficientov vztlaku na uhle výchylky výškového kormidla s predným splitterom a bez

Efekt predného splitteru bude overený aj na letovej konfigurácii aby bolo zistené, či bude nutné opatriť tento prvok zasúvacím mechanizmom alebo či nebude mať na letové charakteristiky výrazný vplyv.

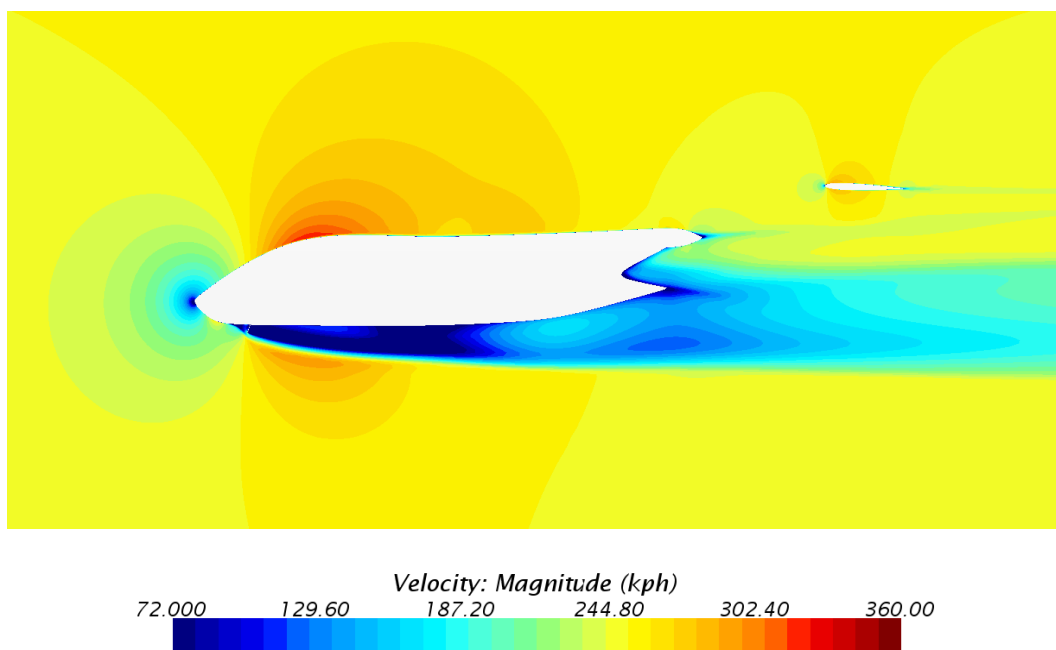
6.3.3.1 Letová konfigurácia

Porovnané sú letové konfigurácie pri dvoch uhloch nábehu, konkrétne 0° a 6° . Simulácie prebiehajú pri podmienkach kalibračného výpočtu (jedinou modifikáciou je predný splitter). Ako sa dalo predpokladať, splitter generuje výrazný úplav pod spodným povrchom Aircaru. Ten je zobrazený na obr. 6.33 pomocou isoplochy s maximálnou hodnotou rýchlosti 10 m/s (36 km/h).



Obr. 6.33: Vizualizácia úplavu za splitterom pomocou isoplochy

Rozrušené prúdenie postupne podmýva celý letún (obr. 6.34). Pri uhle nábehu $\alpha = 6^\circ$ je úplav menej výrazný kvôli natočeniu trupu (obr. 6.35). Pri implementácii splitteru v móde automobil k podobne rozsiahlemu úplavu kvôli blízkosti vozovky nedochádza.

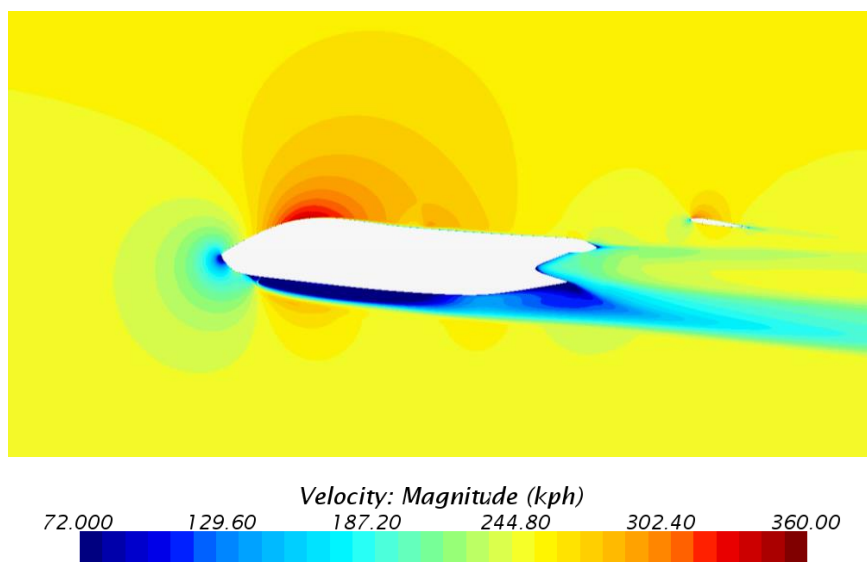


Obr. 6.34: Prúdové pole v okolí letúna s predným splitterom v rovine symetrie ($\alpha = 0^\circ$)

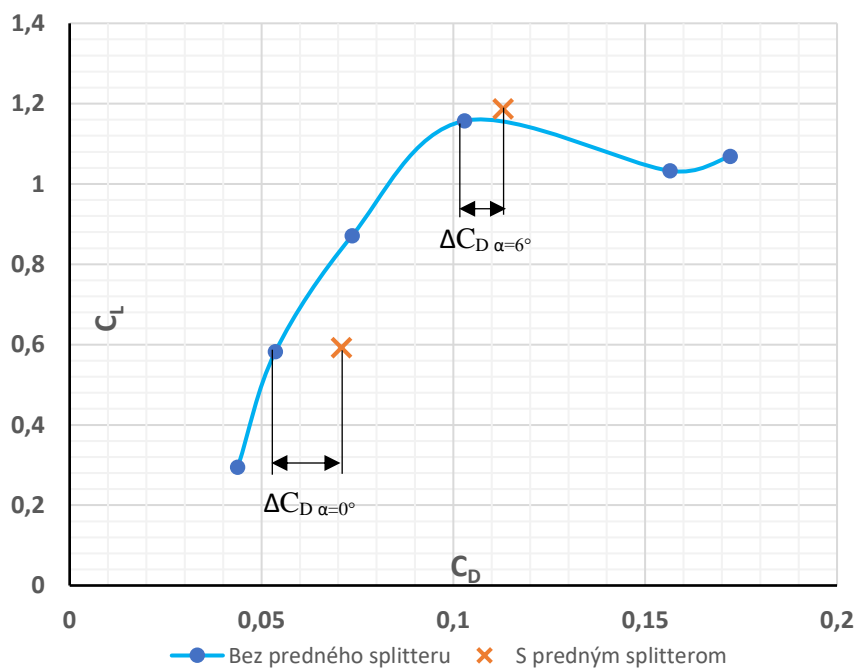


Prítomnosť tohto úplavu sa prejaví na priebehu aerodynamickej poláry (obr. 6.36). Je viditeľné, že prírastok odporu pri 0° je väčší. Preto sa zmení i priebeh poláry.

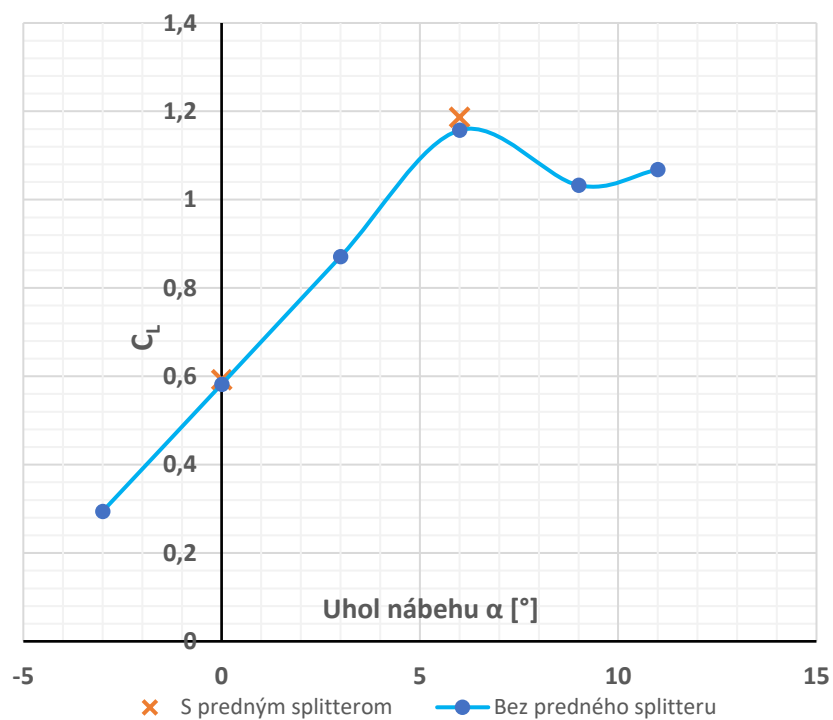
Pokiaľ ide o vztlak, predný splitter naň nemá zásadný vplyv (obr. 6.37). Klopíaci moment (obr. 6.38) v porovnaní s prípadom bez predného splitteru klesá, tzn. že letún klopí viac „na nos“, čo je logické, pretože splitter predstavuje relatívne veľkú plochu na spodnom povrchu pred aerodynamickým stredom krídla, do ktorej sa vzduch „oprie“ a stáča letún.



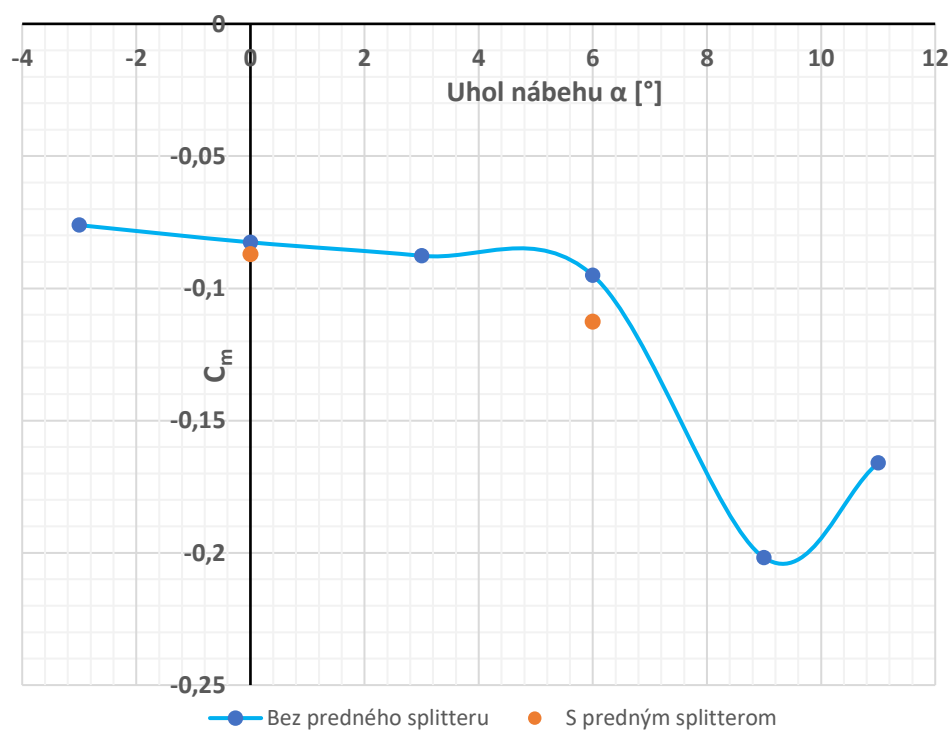
Obr. 6.35: Prúdové pole v rovine symetrie letového režimu s predným splitterom



Obr. 6.36: Porovnanie bodov na aerodynamickej poláre



Obr. 6.37: Porovnanie bodov na vztlakovej čiare



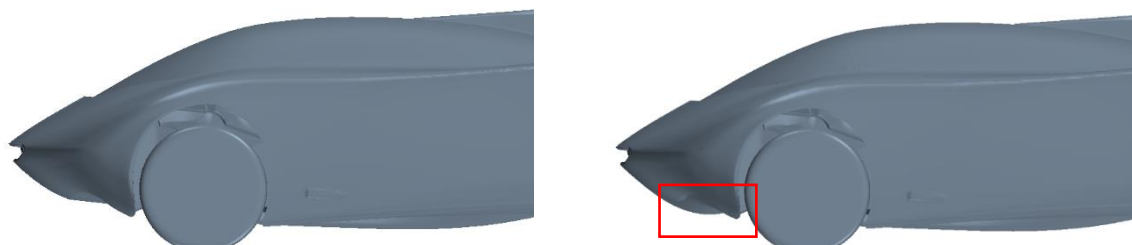
Obr. 6.38: Porovnanie bodov na momentovej čiare



Prírastok odporu od predného splitteru je veľmi výrazný, pri nulovom uhle nábehu viac ako štvrtinový. Jeho implementácia by preto mala negatívny vplyv na letové výkony ako napríklad dolet a vytrvalosť. Taktiež pri vzlete pravdepodobne sťaží zvýšenie uhlu nábehu a odlepenie od vzletovej dráhy. Bude teda vhodné navrhnúť mechanizmus, ktorý sklopí splitter pri letovom režime. Touto problematikou sa však táto práca nezaoberá

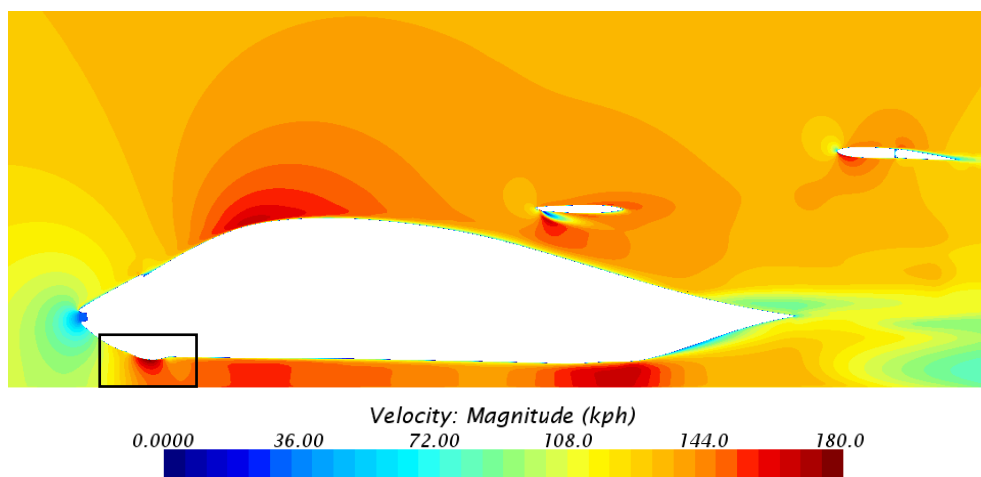
6.3.4 Úprava tvaru prednej časti podlahy

Uvažovanou bola aj konfigurácia s úpravou geometrie v prednej časti podlahy vozidla (obr. 6.39). Tvarovanie typu dýza – difúzor a priblíženie k vozovke má vyvolať lokálny podtlak. Cieľom je dosiahnuť, aby nebolo nutné používať zasúvací prvok v tejto oblasti. Na letový režim by totiž táto úprava mala mať efekt minimálny.



Obr. 6.39: Úprava geometrie v prednej časti podlahy

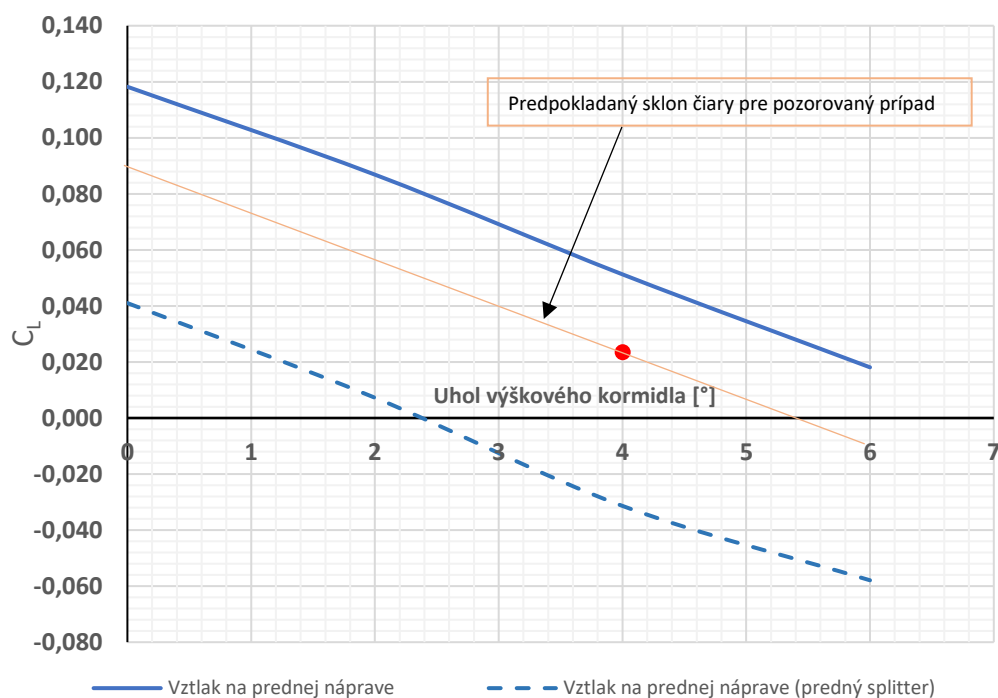
Na obr. 6.40 je zobrazené prúdové pole pozdĺžnom v reze úpravou v prednej časti podlahy. Oblasť urýchleného prúdenia v tejto oblasti je viditeľná.



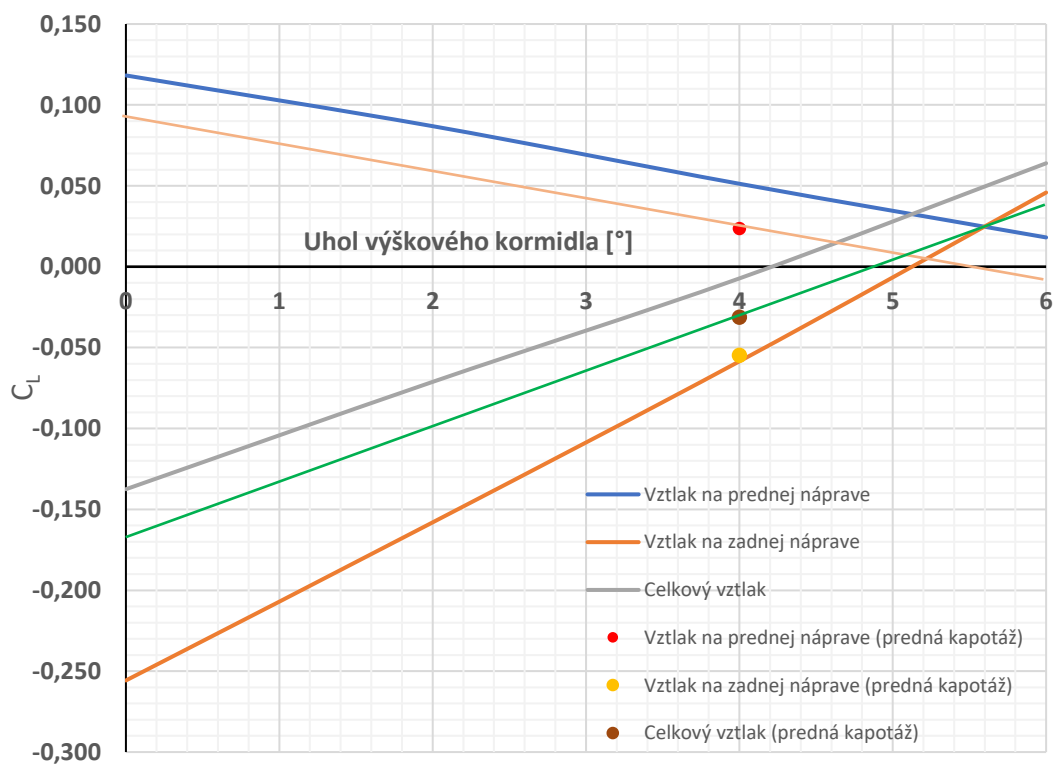
Obr. 6.40: Prúdové pole v okolí oblasti úpravy prednej geometrie

Táto úprava bola odsimulovaná v kombinácii s výchylkou výškového kormidla 4°. Hodnota prítlaku na prednej náprave sa dostala medzi konfigurácie bez a s predným splitterom (obr. 6.41 – červený bod). Dá sa s veľkou pravdepodobnosťou predpokladať,

že sklon čiary závislosti koeficientu vztlaku na výchylke výškového kormidla sa výrazne nezmení, pretože i samotná implementácia predného splitteru naň nemala znateľný vplyv.



Obr. 6.41: Porovnanie vztlaku na prednej náprave pre tri rôzne konfigurácie



Obr. 6.42: Vplyv úpravy prednej časti podlahy na koeficienty vztlaku

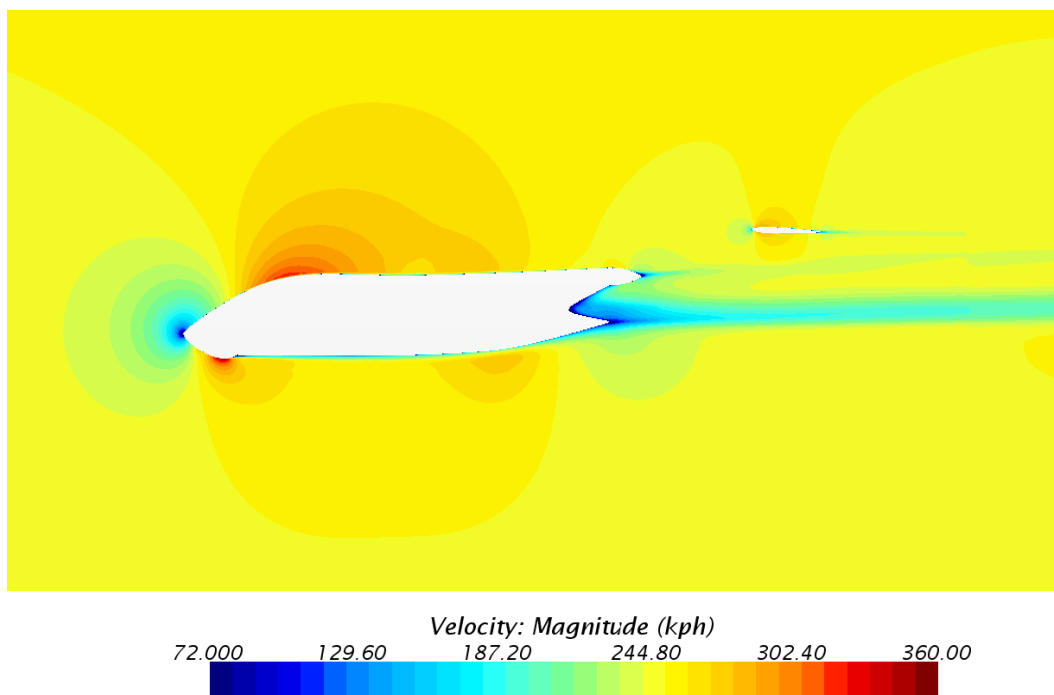


Na obr. 6.42 je porovnanie závislostí koeficientu vztlaku na uhle výchylky výškového kormidla pre stav bez úpravy a s úpravou prednej časti podlahy. Hodnoty pre konfiguráciu s úpravou prednej časti podlahy sú značené ako „predná kapotáž“. Vztlak na zadnej náprave sa dá pre oba prípady definovať ako totožný (krivka „vztlak na zadnej náprave“ pretína bod „vztlak na zadnej náprave (predná kapotáž)“).

6.3.4.1 Letová konfigurácia

Implementáciou zmeny v prednej časti podlahy do letovej konfigurácie bol potvrdený jej minimálny vplyv na prúdenie v okolí Aircaru v tomto režime. Prúdenie na spodnej strane je priľnuté a nevzniká úplav ako pri konfigurácii s predným splitterom (obr. 6.43).

Keďže zmena aerodynamických koeficientov je skutočne zanedbateľná, nie sú zobrazené jednotlivé aerodynamické charakteristiky.



Obr. 6.43: Prúdové pole v okolí letúna s upravenou prednou časťou v rovine symetrie ($\alpha = 0^\circ$)

7 ZÁVER

Táto práca sa zaoberá aerodynamickou analýzou prototypu lietajúceho automobilu Aircar 5.0. Na úvod bola overená vierohodnosť matematického modelu jeho kalibráciou, respektíve porovnaním výsledkov simulácií s tunelovým meraním profilu a letovou skúškou polystyrénového modelu Aircaru v mierke 1:1. Na základe výstupu z kalibrácie bol zvolený turbulentný model a veľkosť buniek výpočtovej siete. Nasledoval CFD výpočet Aircaru v móde automobil sprevádzaný postupným ladením matematického modelu, budovaním jeho komplexnosti a štruktúry výpočtovej siete.

Simuláciami bolo potvrdený predpoklad, že charakter prúdového poľa v okolí Aircaru 5.0 (bez prvkov navrhnutých v tejto diplomovej práci) v móde automobil spôsobuje pozdĺžnu aerodynamickú nestabilitu – zvislé aerodynamické sily pôsobiace na jednotlivé nápravy sú vo výraznej nerovnováhe.

S prihliadnutím na fakt, že má vozidlo relatívne nízku hmotnosť (na každú nápravu pripadá zhruba 350 kg), by táto nerovnováha, konkrétne vztlak na prednej náprave, mohla vyvolať zníženie smerovej stability vozidla (vlastnosti vozidla udržiavať smer pohybu vozidla vlastným riadením pri pôsobení vonkajších síl a momentov). Taktiež by bola znížená trakcia na predných kolesách keďže vozidlo disponuje predným náhomom.

[Konfigurácia A] Na riešenie tohto problému bolo aplikovaných niekoľko spôsobov, všetky založené na implementácii externého aerodynamického prvku. Samotný koncepčný návrh Aircaru 5.0 počítal s využitím vysúvacieho predného krídla v móde automobil (kapitola 6.3.1). Tento prvok sa ukázal ako funkčný – vytvára prítláčnú silu, avšak ani pri vysokom uhle nábehu nebol jeho účinok dostatočný natoľko, aby spĺňal cieľ optimalizácie a to rovnomerné rozloženie prítlaku medzi nápravami. Konštrukčná náročnosť takéhoto mechanizmu je tiež veľmi vysoká. Na druhej strane neuberá veľké množstvo prítlaku zo zadnej nápravy takže celkový prítlak je veľmi vysoký (i keď zhruba 85% z neho pôsobí na zadnú nápravu).

[Konfigurácia B] Efektívnym sa prejavilo riešenie pomocou vychýlenia výškového kormidla nadol – odľahčením zadnej nápravy a tým posunu aerodynamického stredu dopredu (kapitola 6.3.2). Celková prítláčná sila nie je síce na úrovni konfigurácie s predným krídlom, avšak rozloženie aerodynamických síl na nápravách je rovnomernejšie a v istom rozmedzí uhlov vychýlenia kormidla je vplyv týchto síl takmer neutralizovaný (vzhľadom na hmotnosť vozidla). Nie je tiež nutné na vozidlo pridávať žiadnu hmotu navyše a vymýšľať ďalšie zložité konštrukcie. Ďalšou výhodou je minimálny nárast odporu.

[Konfigurácia C] Najvhodnejšou z hľadiska pozdĺžnej aerodynamickej stability sa prejavila konfigurácia s predným splitterom (zvislou doskou pod nosovou časťou vozidla,



kapitola 6.3.3) a výchylky výškového kormidla. Cieľom tejto konfigurácie bolo ešte zlepšiť účinok výchylky výškového kormidla. To sa aj podarilo, pretože v istých uhloch vychýlenia kormidla je prítomný prítlak na celom vozidle a taktiež na jednotlivých nápravách s rovnomerným rozložením 50:50. Dá sa teda povedať, že predný splitter zastupuje funkcie predného krídla a konštrukčne je omnoho jednoduchší. Z dôvodu výrazného zvýšenia odporu pri letovom režime by musel byť predný splitter zasúvací.

[Konfigurácia D] Kompromisom medzi poslednými dvoma spomenutými konfiguráciami je úprava tvaru prednej časti podlahy (kapitola 6.3.4). Upravený tvar o približne 20% redukuje vztlak na prednej náprave a hlavnou výhodou tejto konfigurácie je, že úprava by mala minimálny dopad na letovú konfiguráciu – nevznikal by úplav ako pri implementácii predného splitteru. Taktiež by nebolo nutné konštruovať zasúvací mechanizmus.

Výhody a nevýhody jednotlivých konfigurácií zhŕňa tabuľka 7.1.

Tab. 7.1: Stručné zhrnutie výhod a nevýhod jednotlivých konfigurácií

Konfigurácia	A	B	C	D
Výhody	najväčší celkový prítlak	konštrukčná jednoduchosť; priaznivé rozloženie síl medzi nápravami; minimálny nárast odporu	najvhodnejšie rozloženie síl medzi nápravami; relatívna konštrukčná jednoduchosť	kompromis medzi B a C; relatívne dobré rozloženie síl; minimálne ovplyvnenie letového režimu
Nevýhody	konštrukčná náročnosť; nepriaznivé rozloženie síl medzi nápravami	celkový prítlak je minimálny alebo negatívny (vztlak)	nutnosť zasúvanie splitteru pri letovom režime	menej priaznivé rozloženie síl na nápravách ako v prípade C

Aerodynamický odpor bol taktiež jedným zo sledovaných výstupov simulácií a možno tvrdiť, že vplyv vykonaných úprav na túto veličinu nie je pre režim automobilu nejak výrazný. Všeobecne najvyšší odpor preukazovala konfigurácia s predným splitterom (konfigurácia C), ktorý bol príčinou jeho navýšenia o zhruba 7%. Benefity tohto prostriedku sú však výraznejšie.

Pozdĺžna aerodynamická stabilita vozidla Aircar 5.0 sledovaná v tejto práci nie je jediným problémom vyplývajúcim z charakteru prúdenia v jeho okolí. Do úvahy prichádza aj vplyv bočného vetra (viz. kapitola 2.2.1). Veľká bočná plocha vozidla vrátane masívnych zvislých chvostových plôch budú z najväčšou pravdepodobnosťou vyvolávať výrazný zatačavý moment negatívne ovplyvňujúci stabilitu na vozovke. Z toho dôvodu by tejto oblasti mala v budúcnosti venovať pozornosť a vyskúmať vplyv uhlu vybočenia nabiehajúceho prúdu na zatačavý aerodynamický moment.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. 4th ed. London: Butterworths, 1998. ISBN 07-680-0029-7.
- [2] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. 6. Aufl. Wiesbaden: Viewig, 2013. ISBN 07-680-0029-7.
- [3] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. 1. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428.
- [4] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. Race car vehicle dynamics. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, c1995. ISBN 1560915269.
- [5] FRYŠTÁK, Lukáš. Aerodynamická optimalizace monopostu formule SAE. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedúci práce Ing. Robert Popela, Ph.D.
- [6] FRYŠTÁK, Lukáš. Návrh přitlačných křídel pro vůz Formule Student / SAE. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedúci práce Ing. Robert Popela, Ph.D.
- [7] BRAESS, H.-H., BURST, H., HANNES, R., HAMM, L., Verbesserung der Fahreigenschaften von Personenkraftwagen durch Verringerung des aerodynamischen Auftriebs, 1975, str. 119 – 124
- [8] MCBEATH, Simon. Competition car aerodynamics. 1. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006. ISBN 1844252302.
- [9] Formula One Rear Wing Optimization [online]. , 21-22 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12270/PFC%20%20Formula%20One%20Rear%20Wing%20Optimization.pdf>
- [10] PÁLEŠ, Patrik. Rotace kola ve výpočtech externí aerodynamiky [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105282. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedúci práce Ing. Ondřej Čavoj.



- [11] MCGHEE, R. J. a W. D. BEASLEY. Low-speed aerodynamic characteristics of a 13 percent thick medium speed airfoil designed for general aviation applications [online]. In: . NASA Langley Research Center; Hampton, VA, United States, 1979, s.61-64 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19810003507.pdf>
- [12] Unit I Open and Closed Circuit Wind Tunnel [online]. In: . [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://wtttaerojjcet.blogspot.com/2014/01/unit-i-open-and-closed-circuit-wind.html>
- [13] Individual components and typical naming convention of a Formula 1 front wing. In: Totalsim [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.totalsimulation.co.uk/secrets-formula-1-part-3-role-front-wing/>
- [14] ECKLAND, K.O. Curt-auto. In: Aerofiles [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://aerofiles.com/curt-auto.jpg>
- [15] Waterman Aerobile (1937). In: Car styling [online]. 1999 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://www.carstyling.ru/de/entry/Waterman_Arrowbile_1937_Pervaya_uspeshnaya_model_letayushego_avtomobilya/images/908/
- [16] Fulton (Continental) Airphibian. In: AviaStar [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://www.aviaStar.org/air/usa/continental_fulton.php
- [17] Convair Model 118 ConVairCar [online]. In: . [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://i.redd.it/8sa2pzdcvsp11.jpg>
- [18] Aerocar Model I. In: AviaStar [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://www.aviaStar.org/air/usa/aerocar_model1.php
- [19] The Taylor Aerocar-Flying Car. In: Fiddlers green [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.fiddlersgreen.net/models/aircraft/Aerocar.html>
- [20] Ford Volante Proto (1961). In: Motorbase [online]. 1998 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.motorbase.com/picture/profile/2005/03/28/ford-volante-proto-1961/>
- [21] Boeing Sky Commuter. In: CarScoops [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.carscoops.com/2015/07/boeing-sky-commuter-is-flying-car/>

-
- [22] Terrafugia transition. In: Terrafugia [online]. 2018 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://terrafugia.com/transition/>
- [23] Carver One. In: Sparkdesign [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.sparkdesign.nl/nl/projecten/carver>
- [24] Pal - V Liberty. In: PAL-V [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.pal-v.com/en/explore-pal-v>
- [25] AeroMobil 4.0. In: Aeromobil [online]. 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.aeromobil.com/aeromobil-4_0-stol/
- [26] Maverick. In: Maverick The Flying car [online]. 2017 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://mavericklsa.com/>
- [27] Tatra 77. In: Concorso d'Eleganza Villa d'Este [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.concorsodeleganzavilladeste.com/participants/2017/historic-cars/class-c/tatra-77/>
- [28] How splitter works. In: All-fit automotive [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://allfitautomotive.com/blog/what-is-a-car-splitter/>
- [29] BARLOW, Jason. Wing and a prayer. In: Topgear [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.topgear.com/car-news/big-reads/flying-car-close-reality>
- [30] Flying car. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flying_car
- [31] After a century of failed attempts, PAL-V hopes to make flying cars a reality. In: Verdict [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.verdict.co.uk/flying-car-history-pal-v-liberty/>
- [32] How Flying Cars Will Work. In: Howstuffworks [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/flying-car1.htm>
- [33] Convair Model 118. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Convair_Model_11800



- [34] Aerocar. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerocar>
- [35] 1957 Ford Volante concept car model. In: Car styling [online]. 1999 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://www.carstyling.ru/en/car/1958_ford_volante/
- [36] 1990 Sky Commuter flying car* up for auction by Barrett-Jackson. In: Road and track [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/classic-cars/news/a24698/1990-sky-commuter-flying-car-up-for-auction-at-barrett-jackson/>
- [37] Terrafugia. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Terrafugia>
- [38] Terrafugia Transition. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Terrafugia_Transition
- [39] AeroMobil 4.0 vyrazil dych – cenou aj spracovaním. In: Pod kapotou [online]. zoznam.sk [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://podkapotou.zoznam.sk/cl/1000632/1624299/AeroMobil-4-0-vyrazil-dych--cenou-aj-spracovanim>
- [40] I-TEC Maverick. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/I-TEC_Maverick

ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

D	aerodynamický odpor
L	vztlak
Y	bočná aerodynamická sila
L_Z	vztlak na zadnej náprave
L_P	vztlak na prednej náprave
C_D	koeficient odporu
C_L	koeficient vztlaku
C_Y	koeficient bočnej sily
C_M	koeficient klopiaceho momentu
C_N	koeficient zatačavého momentu
C_R	koeficient kloniaceho momentu
Ψ	uhol zatočenia
v_∞	rýchlosť nabiehajúceho prúdu
C_p	koeficient tlaku
l	dĺžka rázvoru
F_z	normálová sila pôsobiaca na pneumatiku
F_x	reakčná sila pneumatiky
Δx	deformácia pneumatiky
μ_p	koeficient príľnavosti
μ_{\max}	koeficient trenia
β	uhol sklzu
g	gravitačné zrýchlenie
δ_s	Ackermanov uhol



u	rýchlosť vozidla voči vozovke
b, h	svetlá výška vozidla
c	hlbka profilu
CFD	Computational fluid dynamics
ρ	hustota vzduchu
U_τ	šmyková rýchlosť
μ	dynamická viskozita
MSA	medzinárodná štandardná atmosféra
Re	Reynoldsove číslo
S	plocha krídla
c_{sat}	hlbka strednej aerodynamickej tetivy
α	uhol nábehu
a	sklon vztlakovej čiary
f	faktor uvoľnenia výškového kormidla
RANS	Reynolds averaged Navier Stokes
x_{cp}	poloha aerodynamického stredu
A	čelná plocha vozidla
δ	uhol vychýlenia výškového kormidla

PRÍLOHY

A Vizualizácia Aircaru 5.0	102
B Vyhodnotenie letových meraní.....	104
C Vizualizácie kalibračných výpočtov	105
D CFD výpočet vykonaný leteckým ústavom.....	108
E Štruktúra výpočtovej siete vozidla	112
F Ukazatele konverencie výpočtu	119
G Vizualizácie prúdenia ref. stavu automobilu.....	121



A VIZUALIZÁCIA AIRCARU 5.0



Obr. A-1: Vizualizácia návrhu Aircaru 5.0 (pohľad 1)

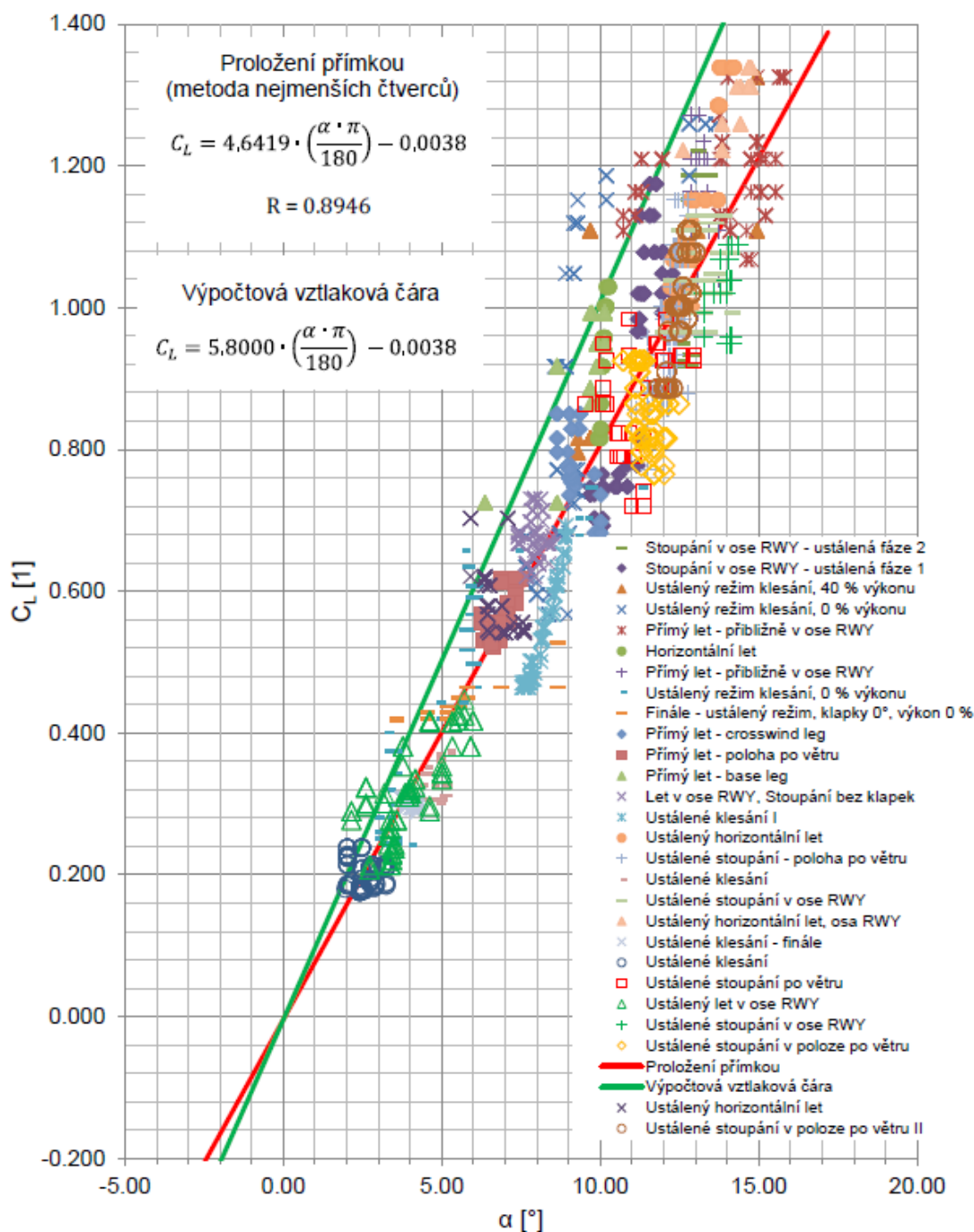


Obr. A-2: Vizualizácia návrhu Aircaru 5.0 (pohľad 2)

B VYHODNOTENIE LETOVÝCH MERANÍ

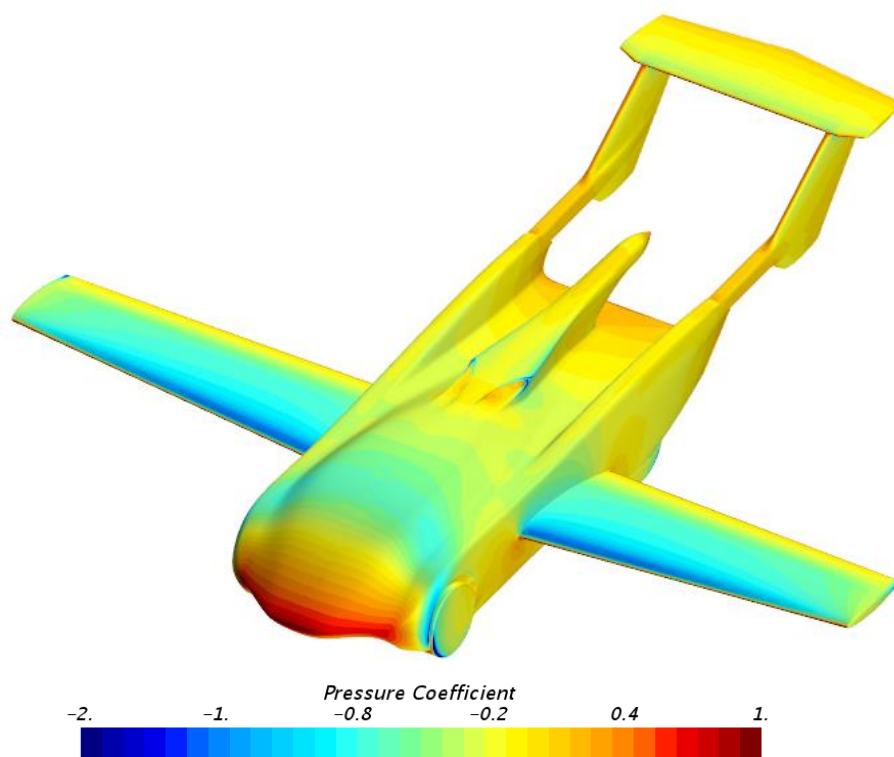
Meranie bolo prevedené celkom pri 4 okruhoch (okruh č. 2 až 5). Meranie je využiteľné pre stanovenie sklonu vztlakovej čiary. Absolútna hodnota uhlu nábehu je vzťahnutá k hodnote elektrickej veličiny (napätia) a neodpovedá definícií uhlu nábehu letúna. Sklon výpočtovej vztlakovej čiary bol použitý pre výpočet zaťaženia v poryve.

Vztlaková čiara - Okruh 2 + 3 + 4 + 5 (data zo všetkých okruhov)

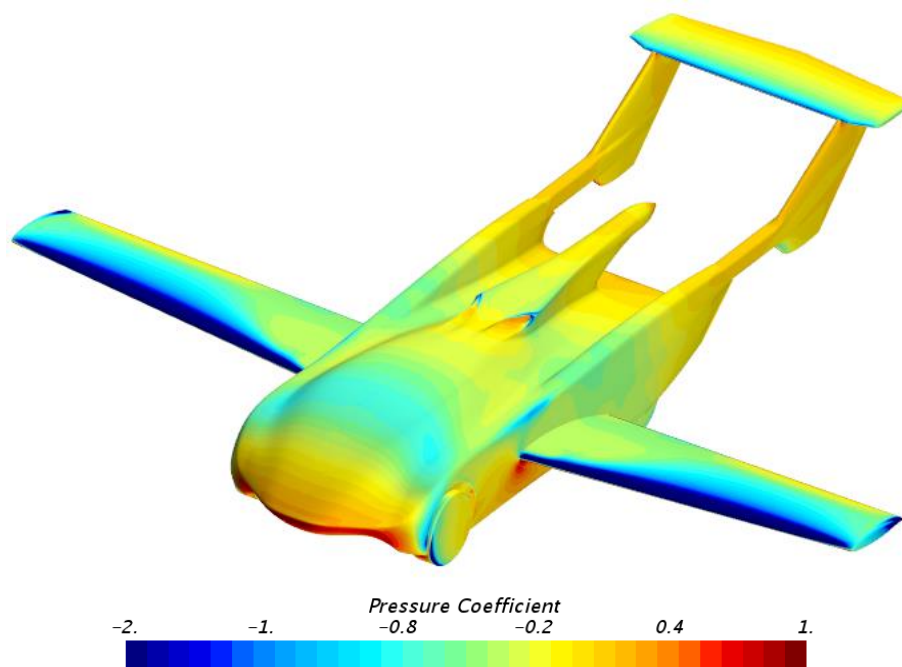


Obr. B-1: Data zo všetkých okruhov

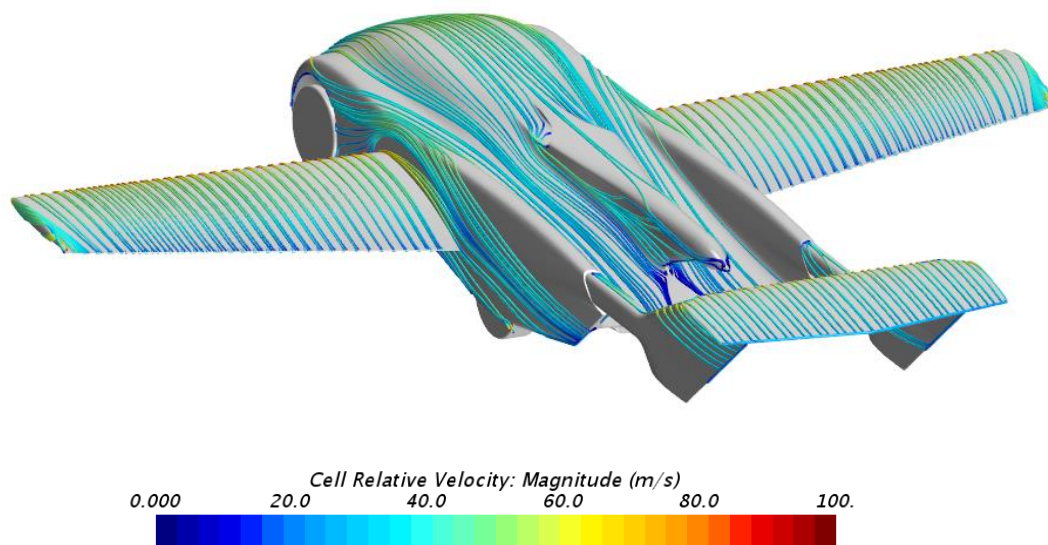
C VIZUALIZÁCIE KALIBRAČNÝCH VÝPOČTOV



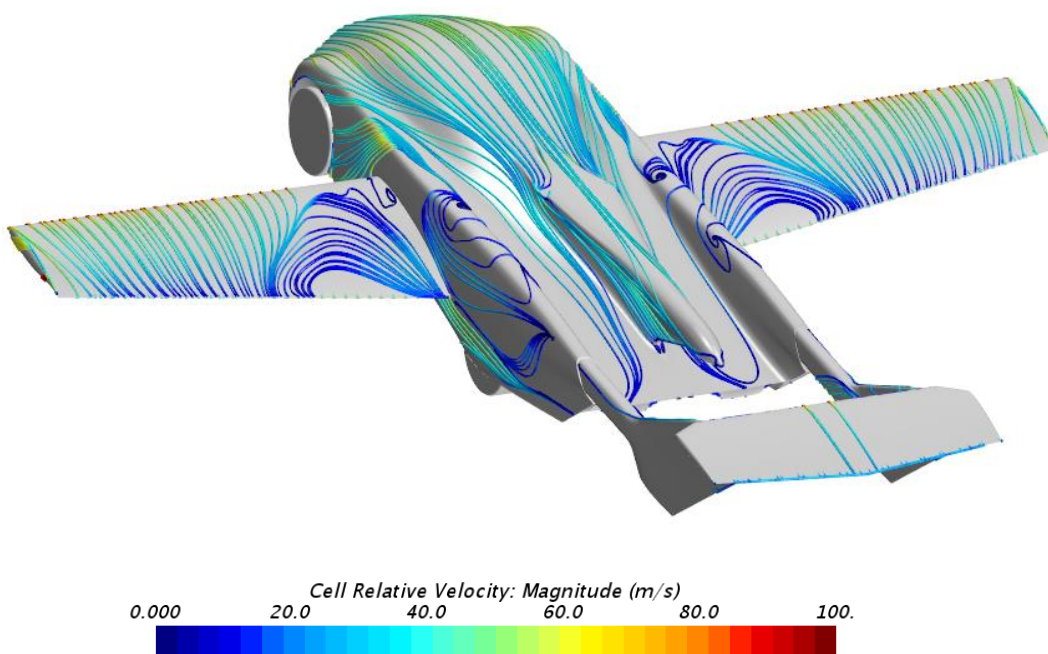
Obr. C-1: Tlakové rozloženie na povrchu v letovom móde pri $\alpha = 0^\circ$



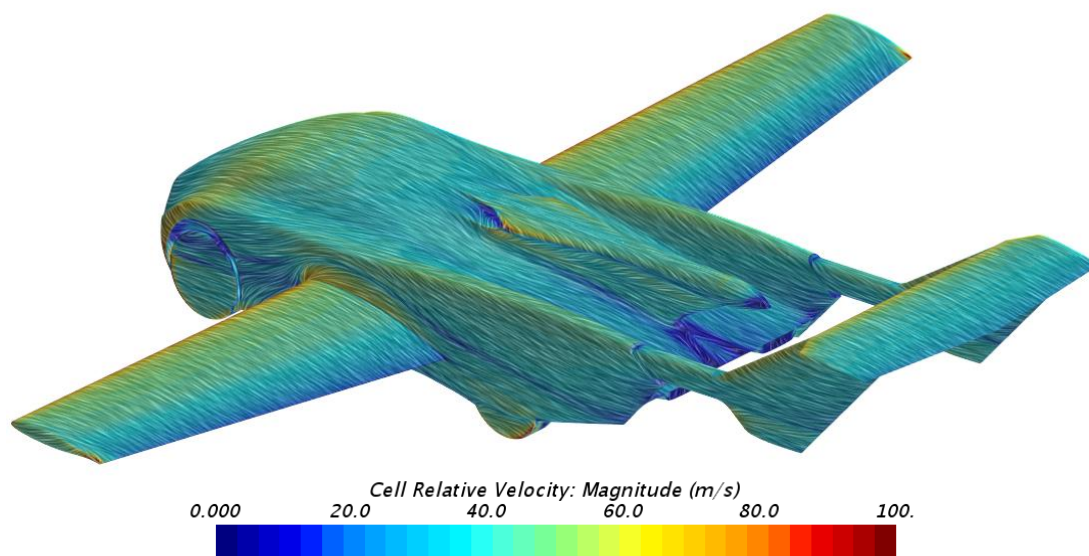
Obr. C-2: Tlakové rozloženie na povrchu v letovom móde pri $\alpha = 9^\circ$



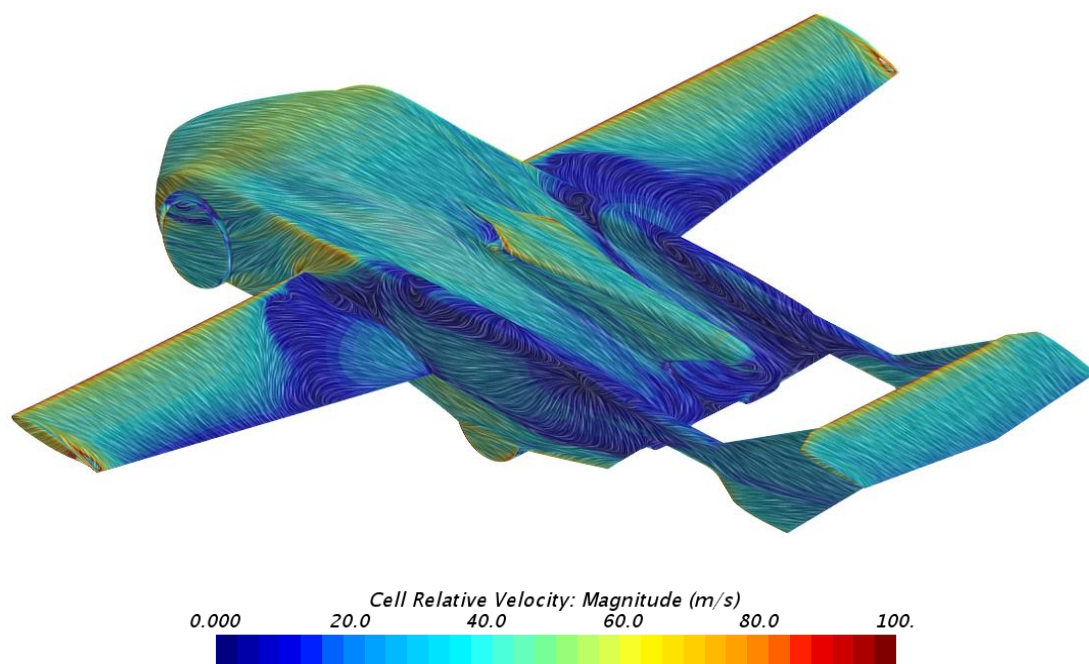
Obr. C-3: Prúdnice na povrchu v letovom móde pri $\alpha = 0^\circ$



Obr. C-4: Prúdnice na povrchu v letovom móde pri $\alpha = 9^\circ$



Obr. C-5: Rozloženie rýchlosti na povrchu v letovom móde pri $\alpha = 0^\circ$



Obr. C-6: Rozloženie rýchlosti na povrchu v letovom móde pri $\alpha = 9^\circ$



D CFD VÝPOČET VYKONANÝ LETECKÝM ÚSTAVOM

Je tu popísané krátke zhrnutie správy vypracovanej Ing. Petrom Doupníkom Ph.D. a schválenej Ing. Robertom Popelom Ph.D.

Výpočty proběhly pro rychlost 250kmh^{-1} , výšku 0m MSA a pět úhlů náběhu.

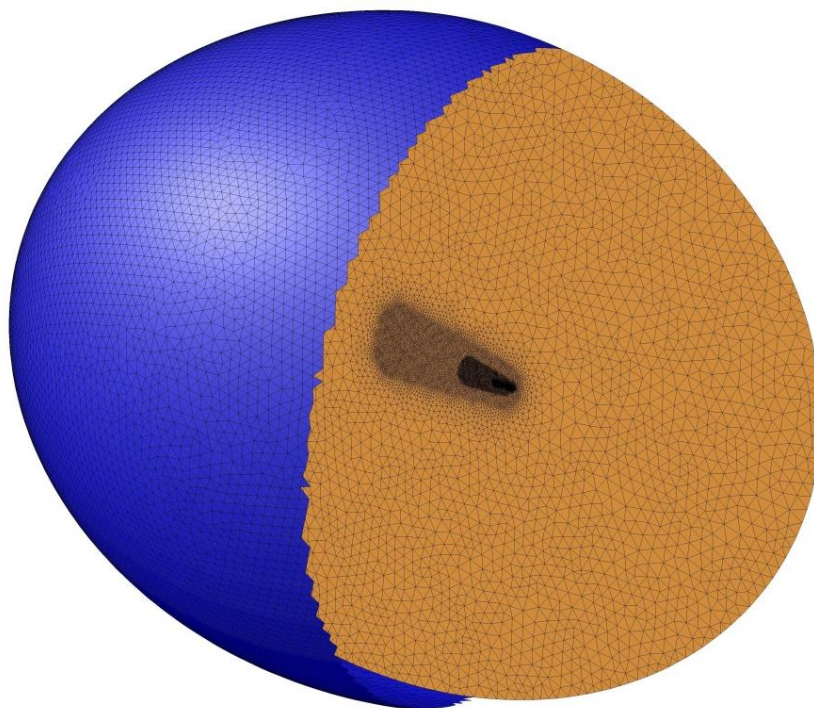
Výpočetní síť byla zvolena 3D hybridní, tvořená na povrchu prizmatickými vrstvami pro řešení mezní vrstvy a tetraedry vyplňujícími zbytek objemu. Vnější hranice výpočetní sítě byla tvořena okrajovou podmínkou pressure-far-field. Pro vytvoření sítě byl použit program Ansys ICEM CFD 15.0, ze kterého byla následně exportována do řešiče Ansys FLUENT 15.0. Model turbulence SST $k-\omega$ byl vybrán na základě předchozích zkušeností s výpočty. Parametry výpočtů shrnuje následující přehled.

Síť

Generátor:	Ansys ICEM CFD 15.0
Typ sítě:	hybridní
Okrajové podmínky:	okolí – typ pressure-far-field rovina symetrie - symmetry části letounu – typ wall
Počet elementů:	23 541 168

Výpočet

Řešič:	Ansys FLUENT 15.0
Fyzikální a výpočetní modely:	Implicitní řešič, stlačitelné proudění, model turbulence SST $k-\omega$, wall $y^+ \approx 1$



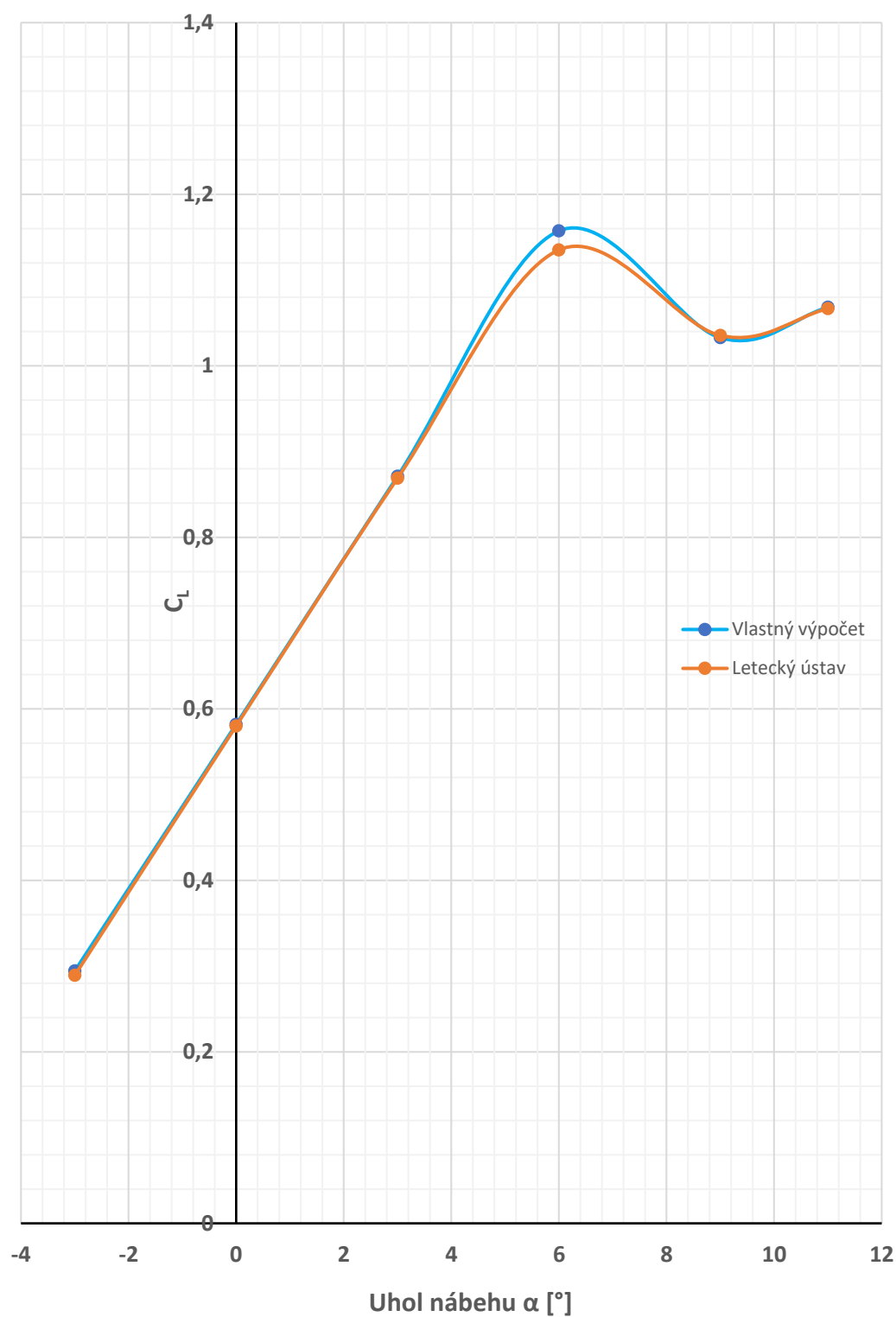
Obr. D-1: Celkové rozloženie výpočtovej siete



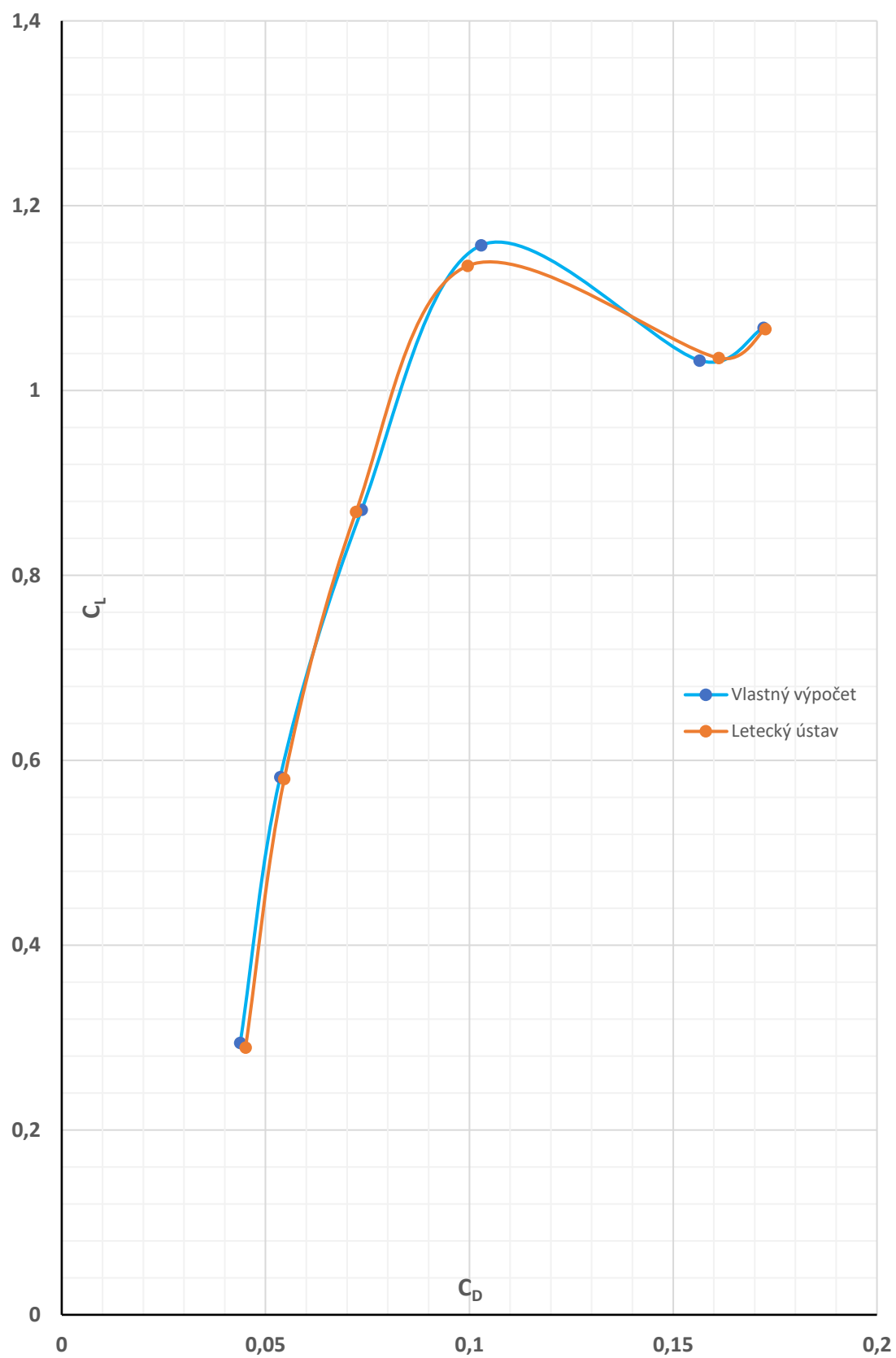
Obr. D-2: Povrchová sieť na letúne



Na nasledujúcich grafoch je znázornené porovnanie vlastných výpočtov a výpočtov vykonaných Ing. Petrom Doupníkom Ph.D.



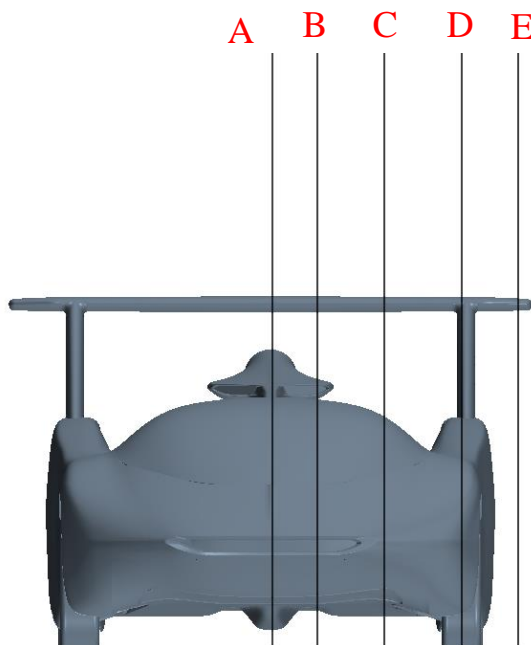
Obr. D-3: Porovnanie vztlakových čiar



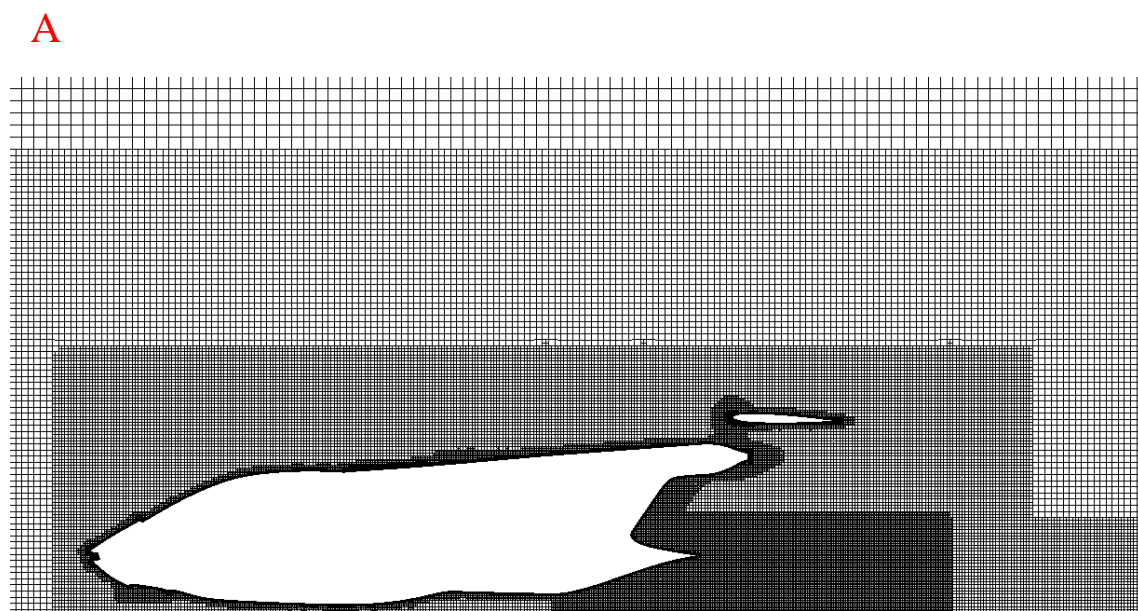
Obr. D-4: Porovnanie aerodynamických polár



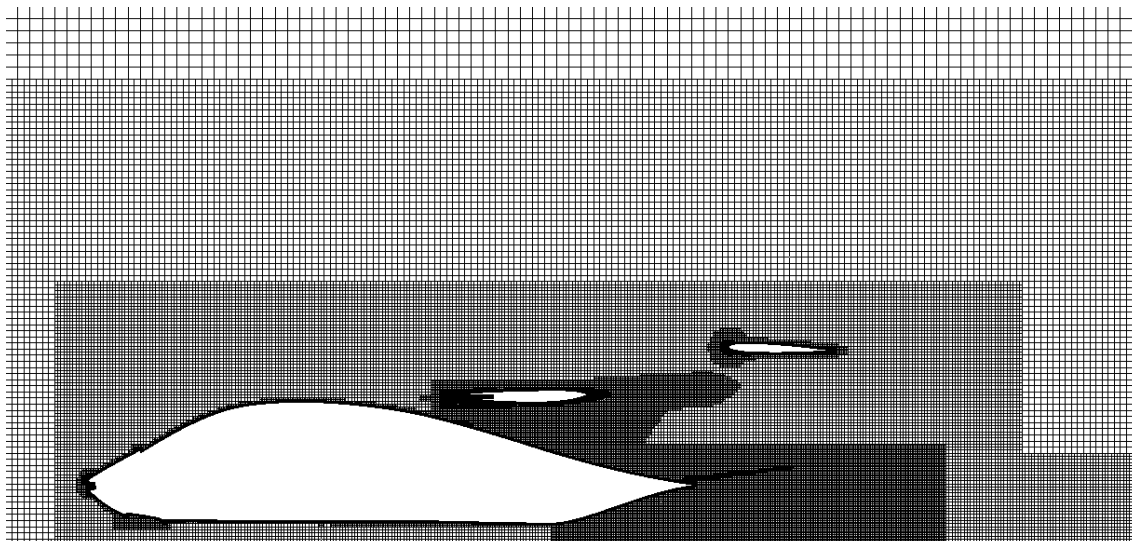
E ŠTRUKTÚRA VÝPOČTOVEJ SIETE VOZIDLA



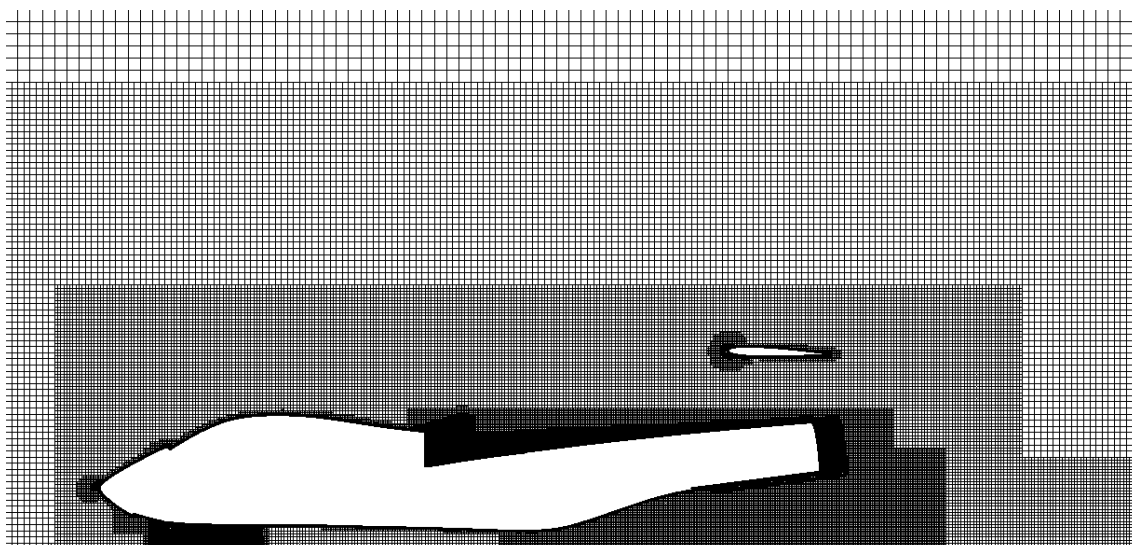
Obr. E-1: Rezy v rovine XZ



Obr. E-2: Sieť v reze A rovinou XZ

B

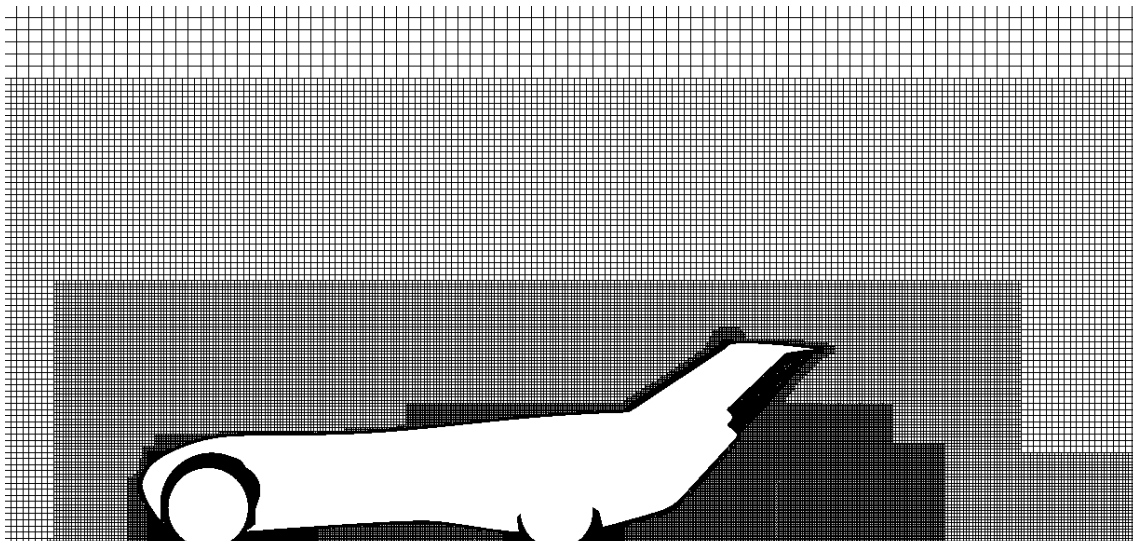
Obr. E-3: Sieť v reze B rovinou XZ

C

Obr. E-4: Sieť v reze C rovinou XZ

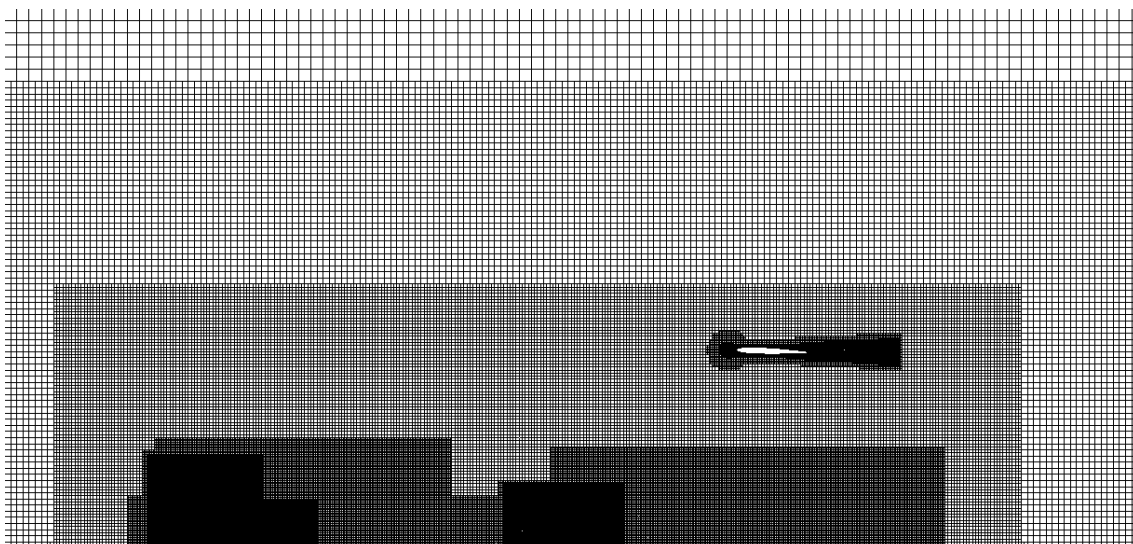


D

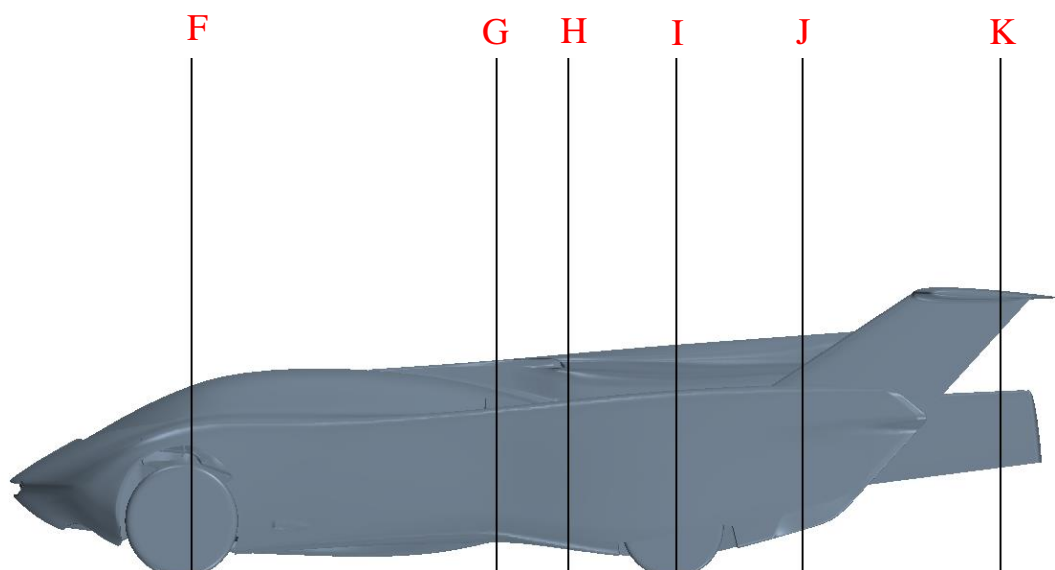


Obr. E-5: Siet' v reze D rovinou XZ

E

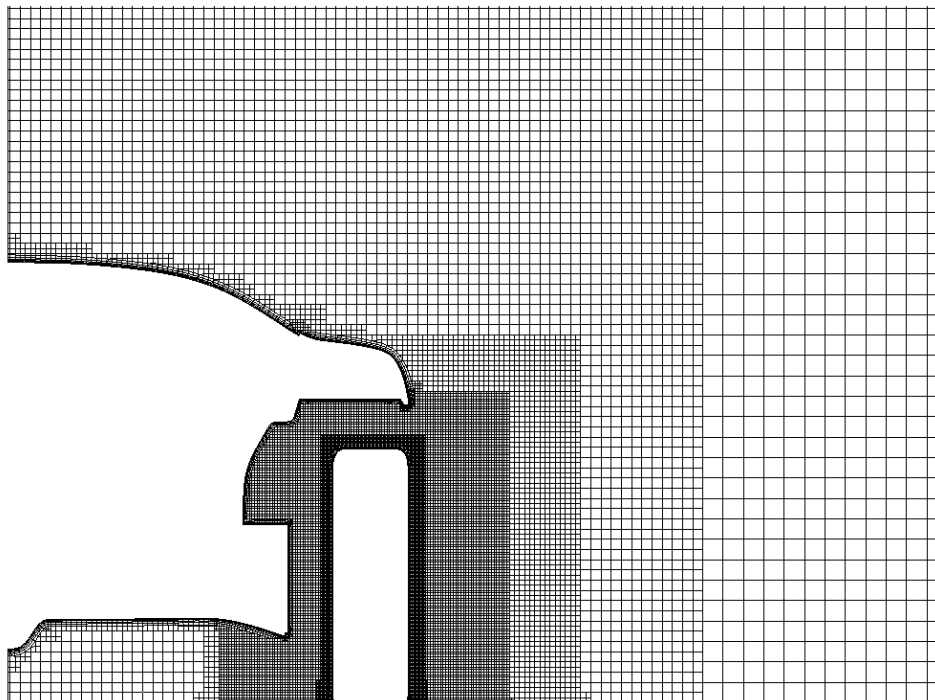


Obr. E-6: Siet' v reze E rovinou XZ



Obr. E-7: Rezy v rovine YZ

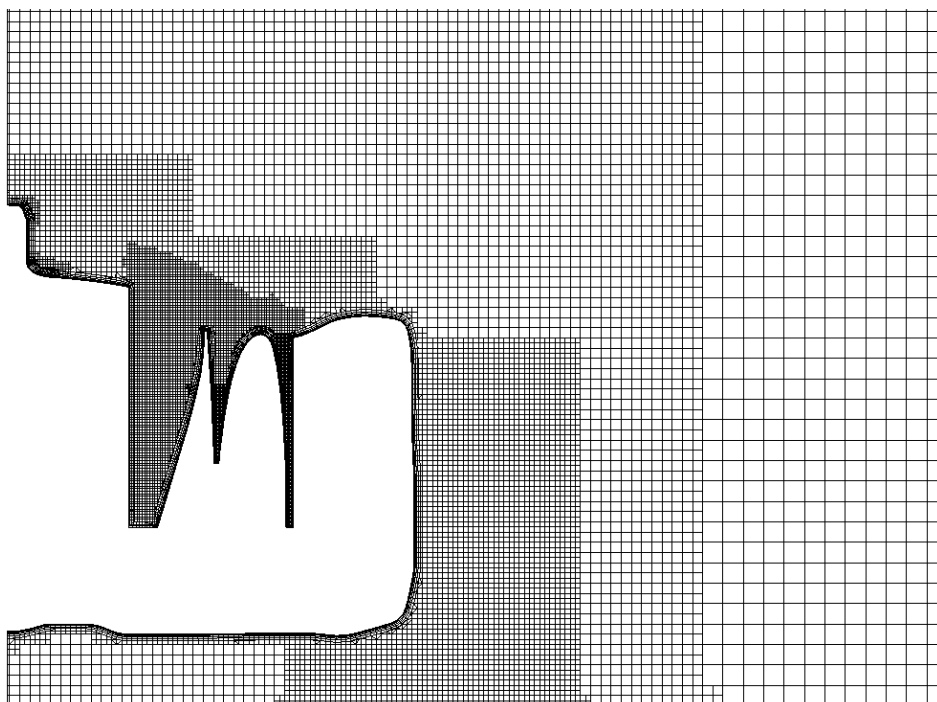
F



Obr. E-8: Sieť v reze F rovinou YZ

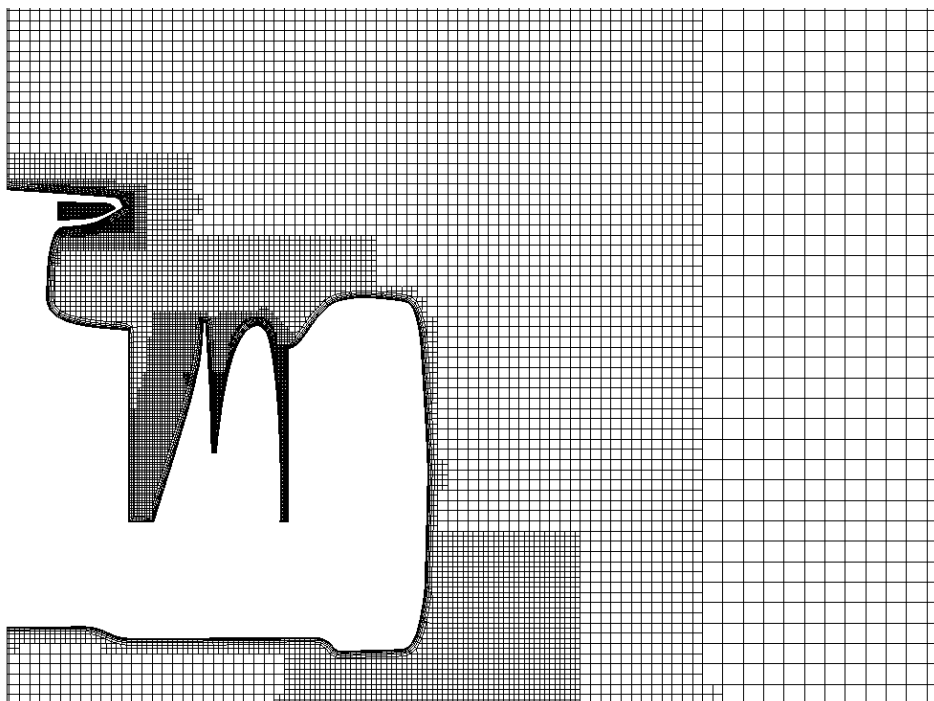


G

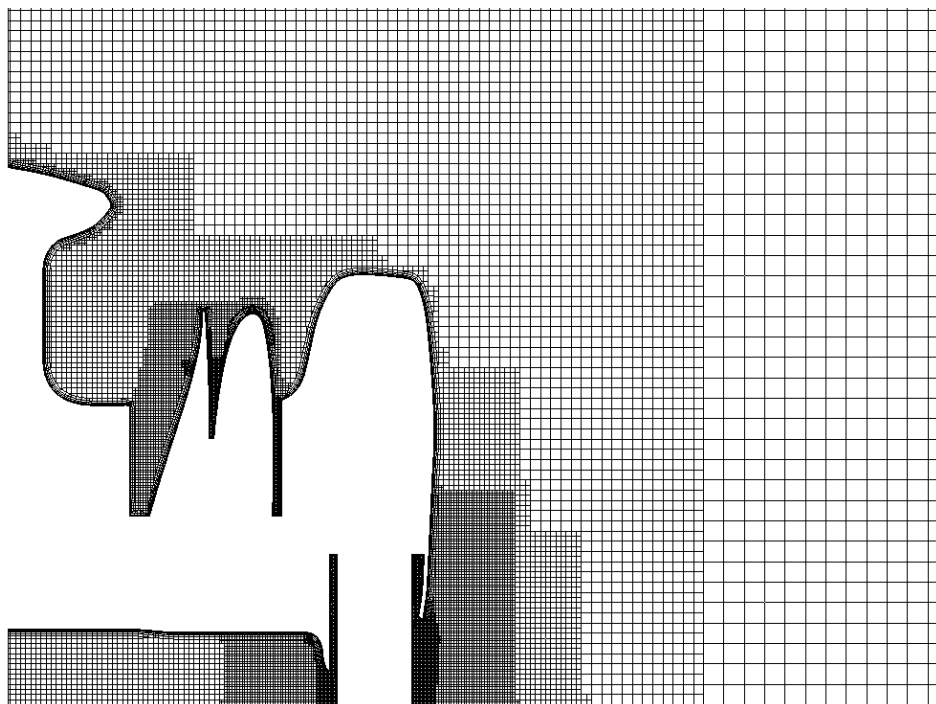


Obr. E-9: Sieť v reze G rovinou YZ

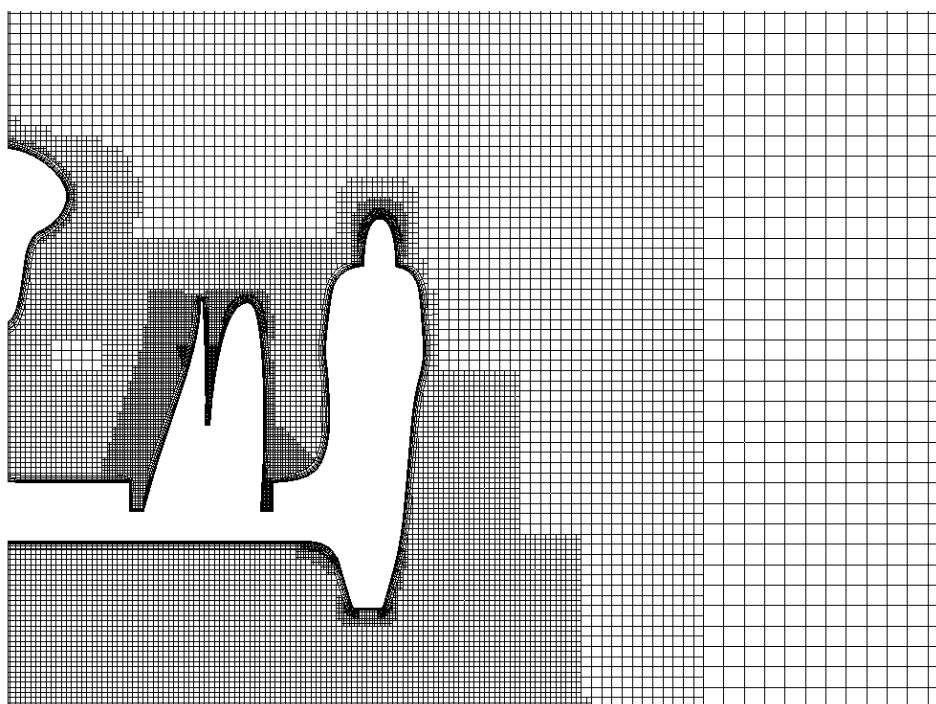
H



Obr. E-10: Sieť v reze H rovinou YZ

I

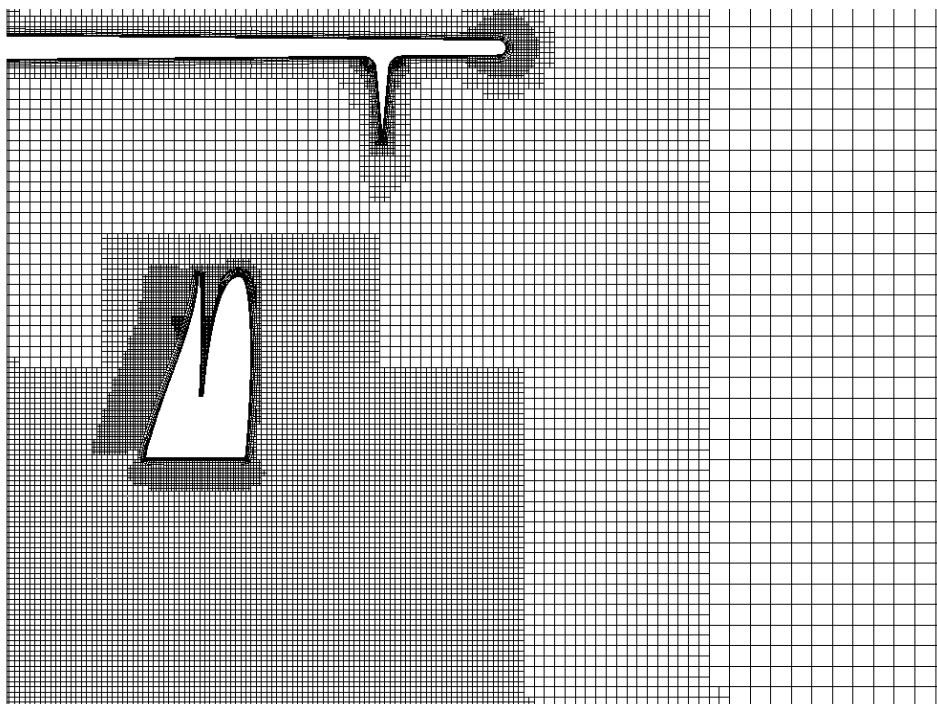
Obr. E-11: Sieť v reze I rovinou YZ

J

Obr. E-12: Sieť v reze J rovinou YZ

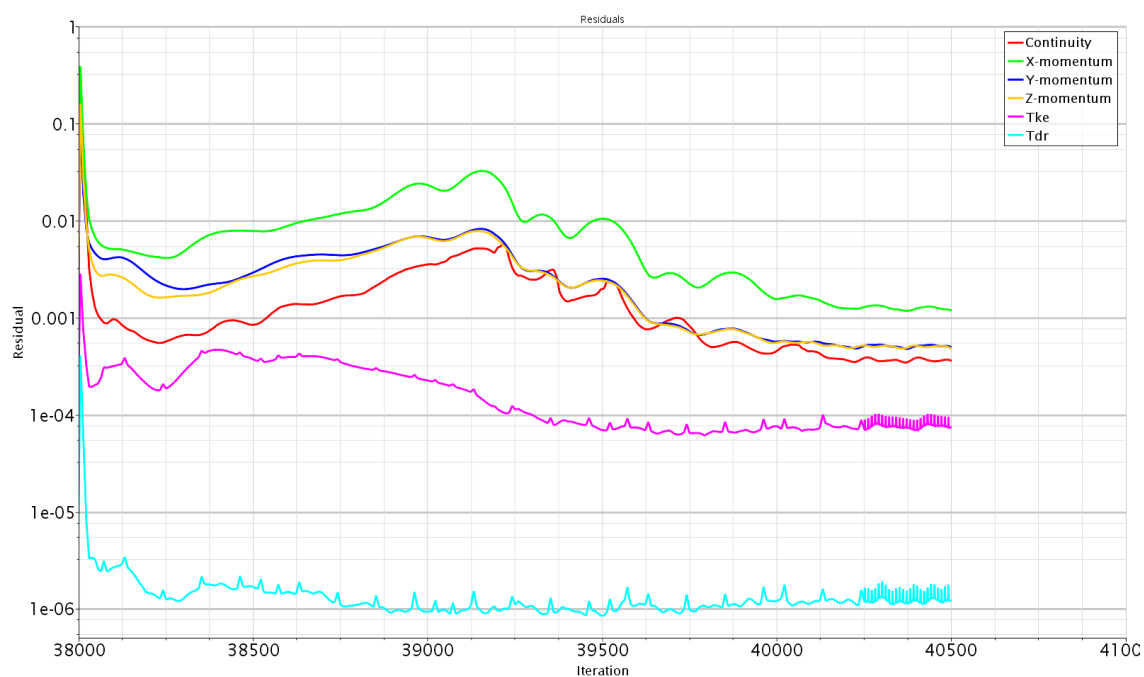


K

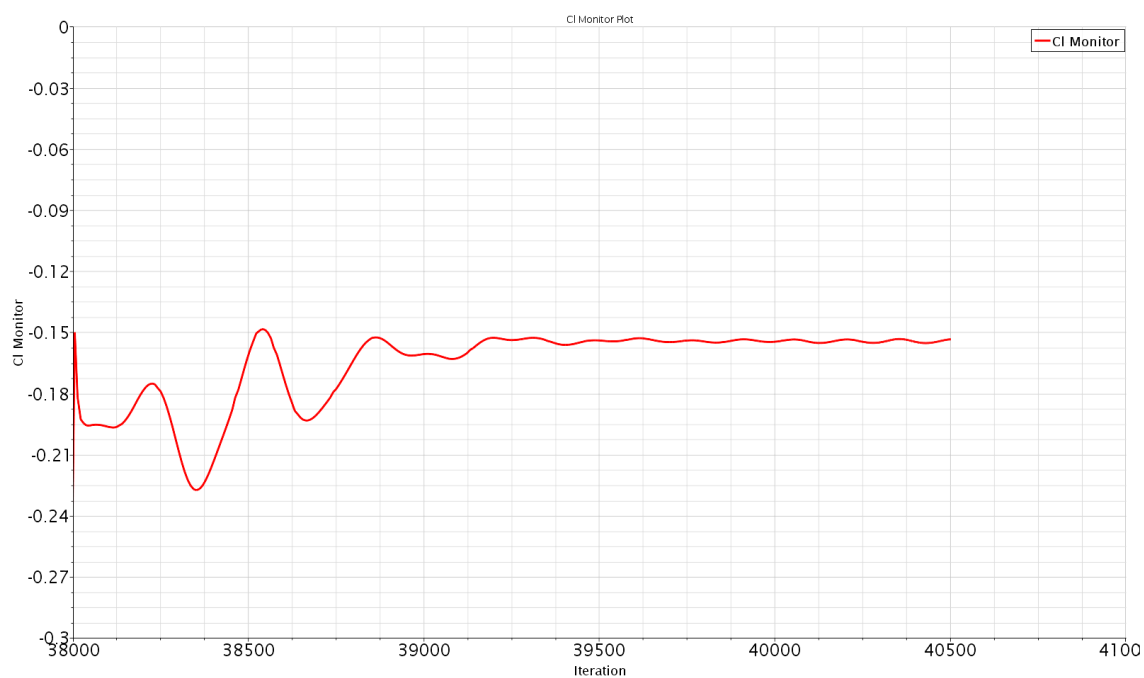


Obr. E-13: Sieť v reze K rovinou YZ

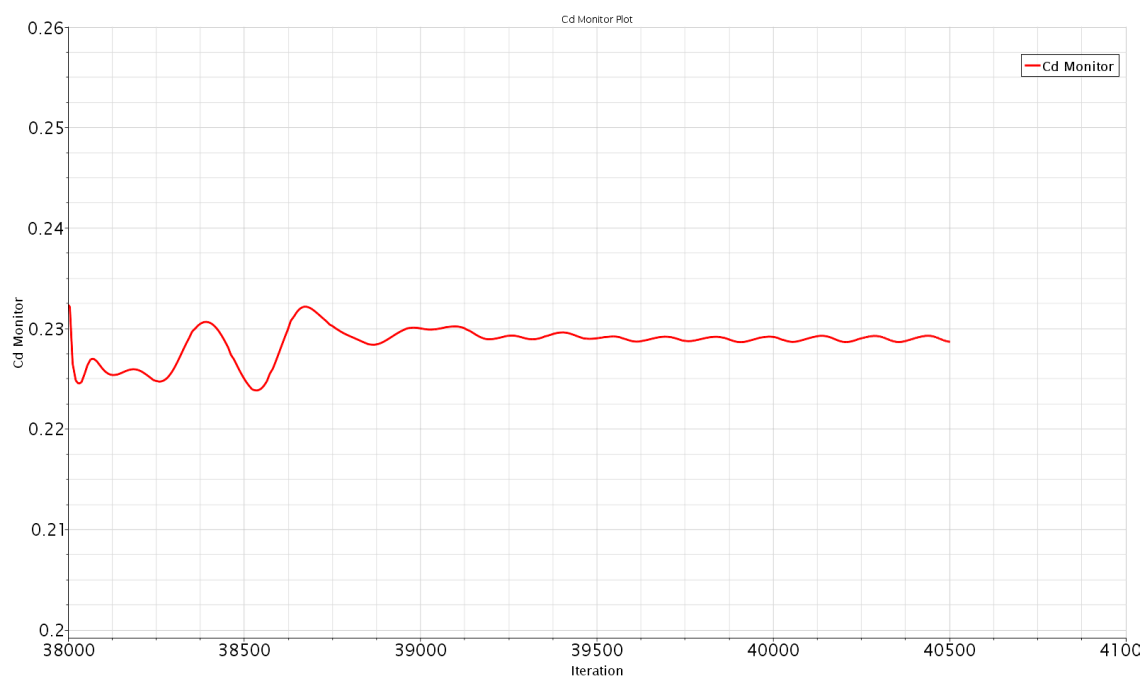
F UKAZATELE KONVERGENCIE VÝPOČTU



Obr. F-1: Rezíduá v poslednom kroku výpočtu referenčného modelu automobilu

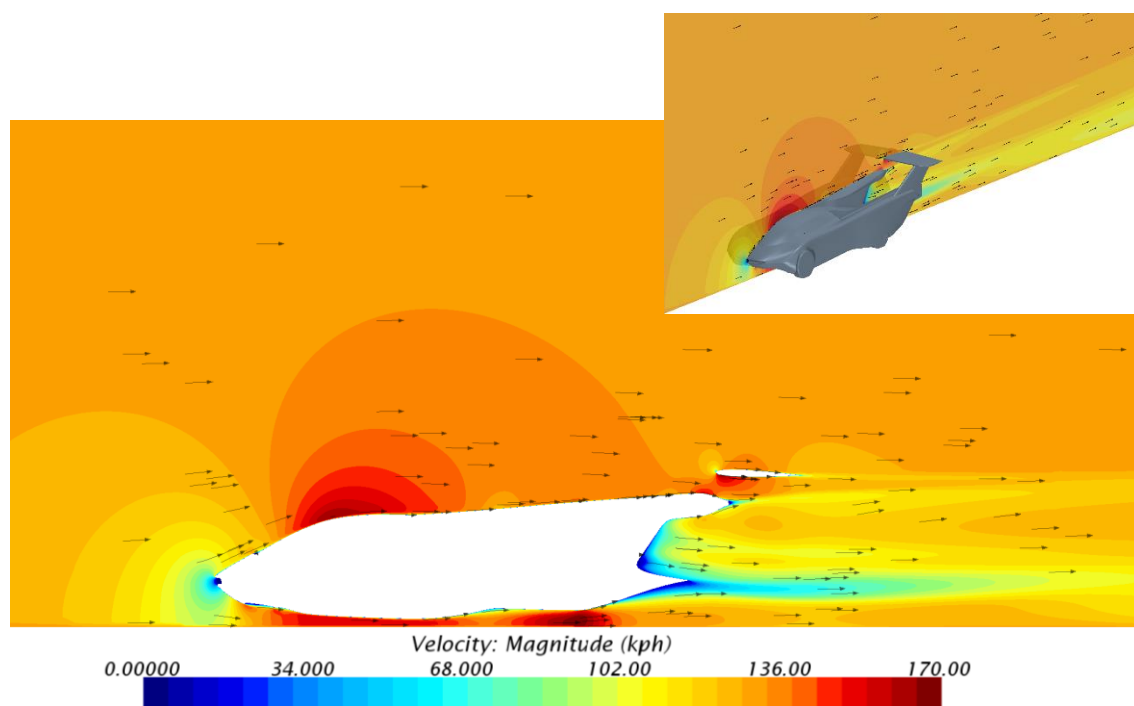


Obr. F-2: Konvergenca hodnoty koeficientu vztlaku C_L

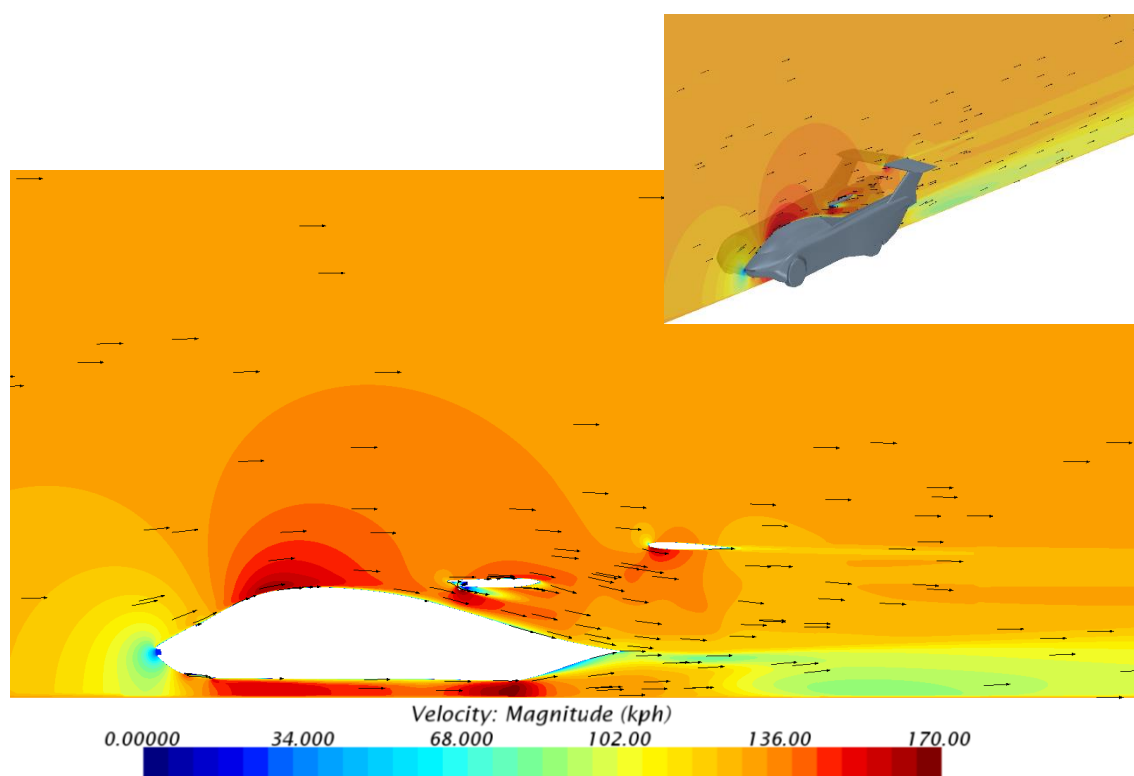


Obr. F-3: Konvergencia hodnoty koeficientu vztlaku C_D

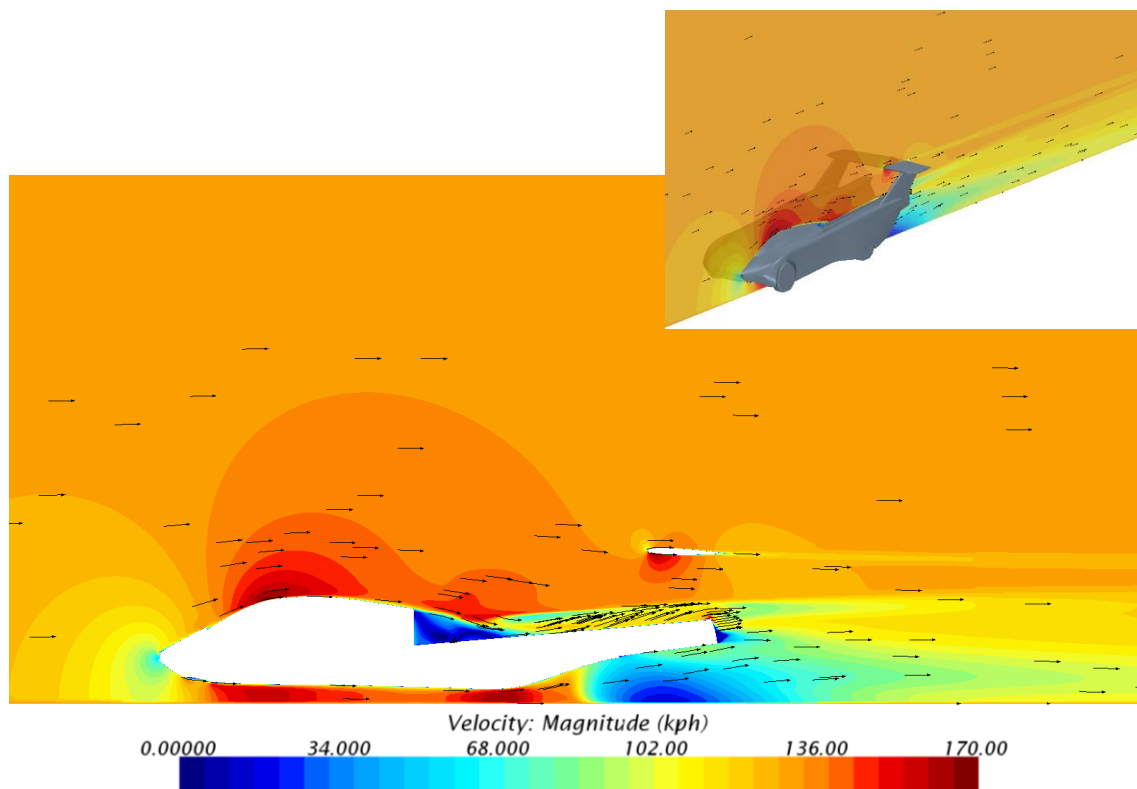
G VIZUALIZÁCIE PRÚDENIA REF. STAVU AUTOMOBILU



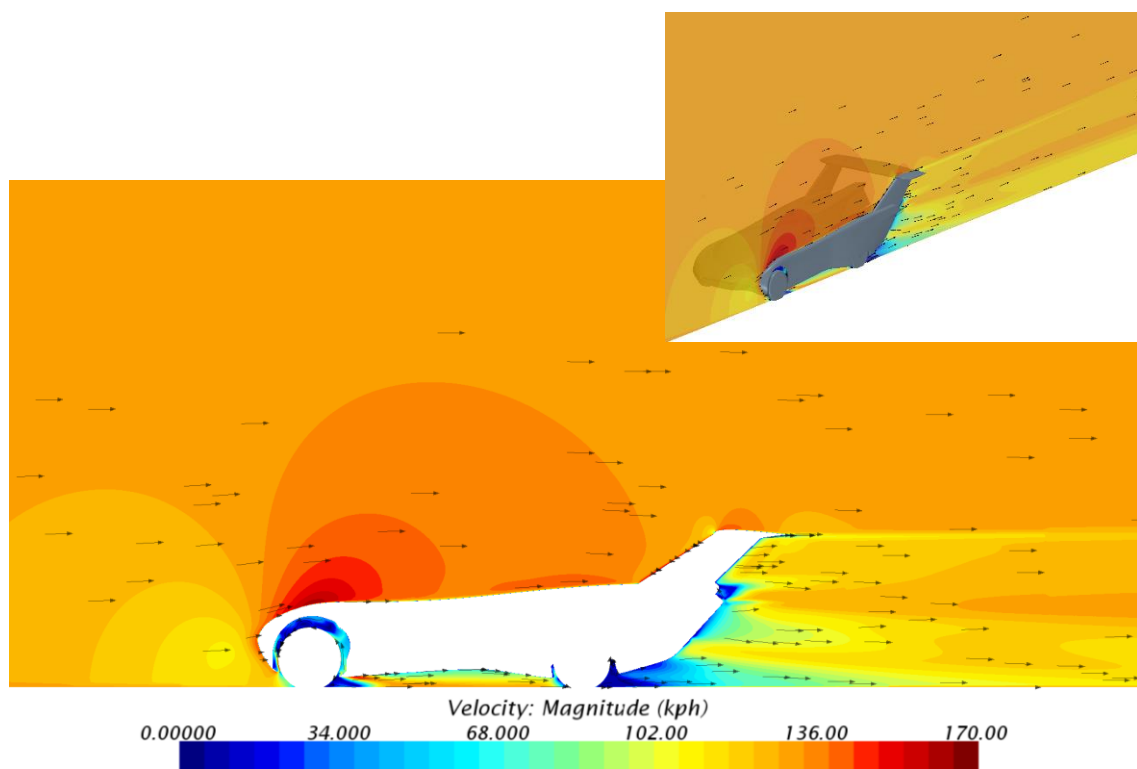
Obr. G-1: Rozloženie rýchlostí v prúdovom poli v okolí Aircaru (rez 1)



Obr. G-2: Rozloženie rýchlostí v prúdovom poli v okolí Aircaru (rez 2)



Obr. G-3: Rozloženie rýchlostí v prúdovom poli v okolí Aircaru (rez 3)



Obr. G-4: Rozloženie rýchlostí v prúdovom poli v okolí Aircaru (rez 4)